

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior



Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos

Área de Ingeniería térmica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Montaje y ensayo de una bomba de agua manual de pistón
de acción directa tipo MALDA**

Autor: JAIME COELLO BALLESTEROS

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industrial de mecánica

Madrid 15 Enero de 2015

Índice General

1. Introducción	8
2. Abastecimiento de Agua.	9
3. Bombeo manual.	14
3.1. Aguas subterráneas.	14
3.2. Necesidades de consumo de Agua.	17
3.3. Concepto VLOM.	21
3.4. Tecnologías para la Captación de Aguas Subterráneas.	23
3.4.1. Acceso al Agua. Pozos.	23
3.4.2. Tecnologías de bombeo.	26
3.4.3. Conclusiones.	28
4. Información preliminar relativa a la bomba.	30
4.1. Evaluación inicial.	30
4.2. Especificaciones técnicas.	30
4.3. Material disponible inicialmente.	39
5. Características de las instalaciones.	42
5.1. Características de instalación óptima (SKAT “Malda Handpump Specification. Revision 2-2005”).	42
5.2. Características de las instalaciones posibles en el laboratorio según la profundidad del depósito.	43
5.3. Características de las instalaciones realizadas.	48
5.3.1. Primer montaje. Cuerpo de la bomba anclado en el primer piso del laboratorio.	48
5.3.2. Segundo montaje. Cuerpo de la bomba anclado en el segundo piso del laboratorio.	51
5.4. Montaje y mantenimiento de la bomba.	61
6. Cálculos previos.	62
6.1. Volumen desalojado, Modelo de Caudal.	62
6.2. Modelo de Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.	63
7. Proceso de ensayo y toma de datos.	75
7.1. Volumen desalojado, Caudal.	75
7.1.1. Caudal de pérdidas en estático.	77
7.2. Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.	82
7.2.1. Carrera de bajada.	82
7.2.2. Carrera de subida.	84
8. Resultados.	90
8.1. Volumen desalojado, Caudal.	90
8.2. Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.	91
8.3. Análisis.	96

Índices

9.	<i>Propuestas sobre métodos para la optimización.</i>	99
9.1.	 Materiales de fabricación.	99
9.2.	 Rediseño de las válvulas.	101
10.	<i>Conclusiones.</i>	105
11.	<i>Incidencias.</i>	107
12.	<i>Bibliografía.</i>	110

Índice de Tablas

Tabla 1: Porcentaje de abastecimiento de agua obtenido de las aguas subterráneas (UNEP y otros, 2000)	15
Tabla 2: Problemas relativos a la calidad de las aguas subterráneas (Foster Lawrence y Morrys 1998).	16
Tabla 3: Clasificación de las enfermedades infecciosas relacionadas con el agua según su mecanismo de transmisión (Rogeaux 1993).	18
Tabla 4: Distribución del uso en porcentajes del agua total usada por los países según su renta per cápita (OMS).	18
Tabla 5: Consumo de agua absoluto por habitante en las diferentes zonas del planeta (OMS, 1996)	19
Tabla 6: Nivel de servicio de agua en relación con la accesibilidad, las necesidades atendidas y los efectos en la salud (OMS 203).	20
Tabla 7: Tecnologías de construcción de pozos (UNICEF 1999).	24
Tabla 8: Opciones de configuración de la MALDA.	35
Tabla 9: Piezas necesarias a cualquier profundidad de instalación.	40
Tabla 10: Piezas subterráneas disponibles inicialmente.	41
Tabla 11: Montajes posibles con el material inicial.	43
Tabla 12: Tabla resumen de piezas necesarias de las tuberías de ascensión y succión para las instalaciones en el primer piso.	49
Tabla 13: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 1.	49
Tabla 14: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 2.	50
Tabla 15: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 3.	50
Tabla 16: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 4.	50
Tabla 17: Dimensiones normalizadas de los tubos PVC-U para abastecimiento de agua potable (UNE-EN 1452-2), AseTUB (2007).	54
Tabla 18: Dimensiones tubos PPR normalizadas y comercializados por la empresa Jimten.	55
Tabla 19: Tubos necesarios para nuestro segundo montaje.	61
Tabla 20: Pesos de elementos utilizados en una instalación estándar.	69
Tabla 21: Pesos de elementos utilizados en nuestras instalaciones.	69
Tabla 22: Fuerzas aplicadas por frecuencia según modelo.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 23: Desglose de elementos de las ecuaciones del modelo con valores constantes para todas las frecuencias.	73
Tabla 24: Volúmenes de agua desalojados a frecuencias establecidas, distancia óptima entre válvulas (experimental).	76
Tabla 25: Comprobación test de descarga.	77
Tabla 26: Método obtención de datos de fuerza aplicada en la carrera de bajada.	82
Tabla 27: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 1.	83
Tabla 28: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 2.	83
Tabla 29: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 3.	83
Tabla 30: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 4.	83
Tabla 31: Pesos carrera de bajada Segundo Montaje.	84
Tabla 32: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 1.	85
Tabla 33: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 2.	86
Tabla 34: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 3.	86
Tabla 35: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 4.	87
Tabla 36: Pesos carrera de subida Segundo Montaje.	89
Tabla 37: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 324cm (HDPE+PVC).	92
Tabla 38: Desglose componentes de la ecuación del modelo para la carrera de bajada para cada frecuencia.	92
Tabla 39: Desglose componentes de la ecuación del modelo para la carrera de subida para cada frecuencia.	93
Tabla 40: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 350cm (HDPE).	94
Tabla 41: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 300cm (HDPE).	95
Tabla 42: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 324cm (PVC+HDPE).	95
Tabla 43: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 724cm (PVC+HDPE).	95

Índice de Gráficos.

Gráfico 1: Detalle del porcentaje de agua apto para el consumo humano y su situación.....	9
Gráfico 2: Incremento en la demanda anual de agua de 2005 a 2030 (Banco mundial basado en Water Resources group, 2009).	11
Gráfico 3: Incremento de la frecuencia e impacto de desastres naturales reportados en África (Banco Mundial 2010). ..	12
Gráfico 4: Cobertura de servicios de abastecimiento de agua según riqueza de los países (AICD, 2011).	20
Gráfico 5: Caudal teórico vs frecuencia.	63
Gráfico 6: Evolución de los valores de $\rho \cdot V^{222K} A1$ con la frecuencia.....	74
Gráfico 7: Volumen desalojado Vs Frecuencia (experimental) a distancia óptima entre válvulas.	76
Gráfico 8: Fuerza aplicada Vs Tiempo invertido, carrera de bajada.	84
Gráfico 9: Fuerza aplicada Vs Tiempo invertido, carrera de subida.....	89
Gráfico 10: Rendimiento volumétrico, η_v vs frecuencia.....	90
Gráfico 11: Caudal de pérdidas, Q_p vs frecuencia.	91
Gráfico 12: Tensión Vs Deformación de plásticos utilizados para fabricación de tubos. After Odian, George; Principles of Polymerization, 3rd ed., J.Wiley, New York, 1991.	99

Índice de Figuras.

Figura 1: Mapa disponibilidad de agua dulce por persona y año, 2007 (FAO, Naciones Unidas y WRI).	10
Figura 2: Situación y naturaleza de las aguas subterráneas en el planeta (UNESCO y BGR).	16
Figura 3: Disponibilidad (reliability) frente a durabilidad (Arlosoroff, 1987).	22
Figura 4: Instalación en pozo perforado/Instalación en pozo excavado (Anexo 2).	25
Figura 5: Niveles de agua subterránea (Reynolds, 1992).	26
Figura 6: Detalle de la cámara de compresión y las válvulas.	31
Figura 7: Detalle del funcionamiento de la bomba en la carrera de bajada.....	32
Figura 8: Detalle del funcionamiento de la bomba en la carrera de subida.	33
Figura 9: Detalle del cuerpo de la bomba y del accionador.	36
Figura 10: Opciones de configuración.....	36
Figura 11: Tabla de selección de componentes subterráneos según profundidad de instalación (SKAT 2005).	38
Figura 12: Elementos subterráneos.	41
Figura 13: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión y distancia hasta el fondo del pozo óptimas (mm). ..	44
Figura 14: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión óptima y distancia hasta el fondo del pozo reducida (mm).	44
Figura 15: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión y distancia hasta el fondo del pozo reducidas (mm).	45
Figura 16: Croquis de las instalaciones posibles en el laboratorio con detalle de la zona de anclaje (mm).	47
Figura 17: Detalle de las distancias entre válvulas en el PMI de los montajes en el primer piso del laboratorio. De izquierda a derecha, opción 1, opción 2 y opciones 3 y 4 (igual distancia)(mm).	51
Figura 18: Secuencia de montaje del Cono de compresión (Plano C2095).	56
Figura 19: Detalle de los sistemas de estanqueidad en ambas válvulas y de sujeción en la válvula de pie.	57
Figura 20: Croquis de la ubicación de los nuevos conectores en los tubos que componen la varilla para la instalación en el segundo piso del laboratorio.	60
Figura 21: Posiciones de los puntos de referencia para el desarrollo del modelo.	64
Figura 22: Esquema alturas para el desarrollo del modelo.	65
Figura 23: Esquema de los orificios de paso del fluido por las válvulas.	71
Figura 24: Detalle válvula de pie abierta. Ubicación de puntos singulares y líneas de flujo.....	102
Figura 25: Evolución de la fisionomía de la válvula de pie y líneas de corriente con la implantación de las propuestas de optimización.....	103

1. Introducción

En el proyecto que sigue, comenzaremos adentrándonos en el mundo del bombeo manual, sus orígenes, principales fines y características más singulares para más adelante concentrarnos en el estudio de la bomba manual de acción directa tipo MALDA, más concretamente en su montaje, ensayo y caracterización. Analizaremos tantos aspectos de su funcionamiento como nuestras posibilidades nos permitan persiguiendo el objetivo de completar y, si es necesario, matizar toda la información hasta ahora ofrecida relacionada con este tipo de bombas.

El estudio se basará en la instalación de la bomba en un laboratorio habilitado para tal fin compuesto por dos diferentes alturas de montaje. En los apartados sucesivos se detallarán cuidadosamente las características de las instalaciones posibles aunque teniendo en cuenta que la MALDA está diseñada para la extracción de agua a bajas profundidades, consideraremos la información obtenida y a continuación expuesta como muy valorable para la consecución de nuestra empresa.

Teniendo siempre en cuenta que el objeto de nuestro estudio no es simplemente un sistema para la obtención de agua en la superficie, sino un medio de supervivencia para numerosos núcleos de población, intentaremos enfocar todo lo posible nuestro trabajo a la obtención de resultados y conclusiones útiles para usuarios. El aspecto económico es en éste caso más importante si cabe que en la mayoría de ocasiones con lo que no olvidaremos a los fabricantes intentando también proponer alternativas para la disminución o aumento del coste de producción y materias primas en relación con las prestaciones conseguidas por los cambios de diseño o materiales.

Como es normal, uno de los aspectos más importantes si no el que más en el ámbito del bombeo manual es la optimización energética del sistema, ya que, normalmente será una persona la responsable de generar la fuerza accionadora del mecanismo. Nuestra misión se centrará en caracterizar los esfuerzos necesarios para el funcionamiento, también estudiaremos el volumen de agua desalojado con éxito y los caudales de pérdidas a demás de proponer, si fuera posible, cambios para maximizar la eficiencia del conjunto.

Sin más preámbulos comenzamos con la esperanza de ayudar, aportando nuestro grano de arena, a todo el que de una manera u otra necesite de información o inspiración relativa a las bombas de agua manuales de acción directa

2. Abastecimiento de Agua.

Desde su aparición el agua es un recurso de inestimable valor para los seres vivos. Todos y cada uno de ellos estamos compuestos por células que necesitan una proporción determinada del líquido elemento para realizar sus funciones. Concretamente constituye el 55% del peso de un ser humano y su no existencia en niveles óptimos para el organismo produce deshidratación, que en casos graves puede llegar a ocasionar un fallo cardiovascular e incluso la muerte.

Se puede considerar que el agua es un recurso abundante en el mundo pues la utilizamos en innumerables ocasiones a lo largo del día. Es universalmente conocido que la mayoría de la superficie de nuestro planeta esta bañada por agua, sin embargo, la mayoría de la inmensa cantidad de volumen del que disponemos no es apta para el consumo humano.

Si extendiéramos todo el agua existente en nuestro planeta sobre la superficie terrestre, formaría una capa de 3.000 metros de profundidad. Pero la distribución sería diferente si atendiéramos a su capacidad para sernos útil. De ésta forma, el 97% del agua se encuentra en mares y océanos en forma salada, lo que la hace prácticamente inútil para alimentación, agricultura, ganadería y la mayor parte de los procesos industriales. El 3% del agua restante es dulce, pero casi toda localizada en estado sólido en glaciares y los Polos, aproximadamente 2%, o en estado líquido pero en emplazamiento es de difícil acceso para su extracción como en depósitos subterráneos.

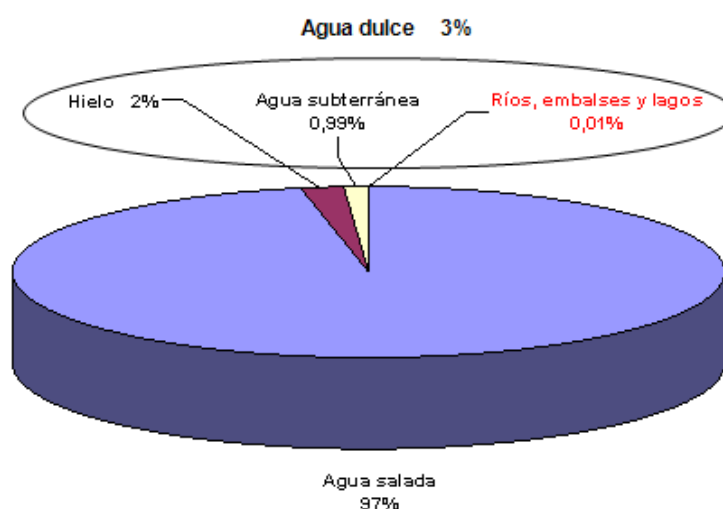


Gráfico 1: Detalle del porcentaje de agua apto para el consumo humano y su situación.

Se pueden considerar los ríos, lagos, la humedad del suelo y las cuencas de aguas subterráneas poco profundas como las principales fuentes de agua para uso humano. El problema es que la gran parte de ellas se encuentra lejos de los núcleos de población, lo que dificulta en gran medida su aprovechamiento.

A priori, esta cantidad de agua aprovechable sería suficiente para abastecer las necesidades de toda la población mundial pero se plantean algunos problemas.

Por un lado, la cantidad y calidad del agua no se distribuye de forma regular en todas las regiones del planeta. Además su accesibilidad, explotación y distribución difiere mucho dependiendo

Abastecimiento de Agua

de la zona geográfica donde nos encontremos, generándose un entorno mucho más favorable en los países con más recursos. Las personas que tienen la suerte de residir en dichos países tienen una probabilidad mucho más alta de disfrutar un suministro aceptable en cuanto a calidad y cantidad.

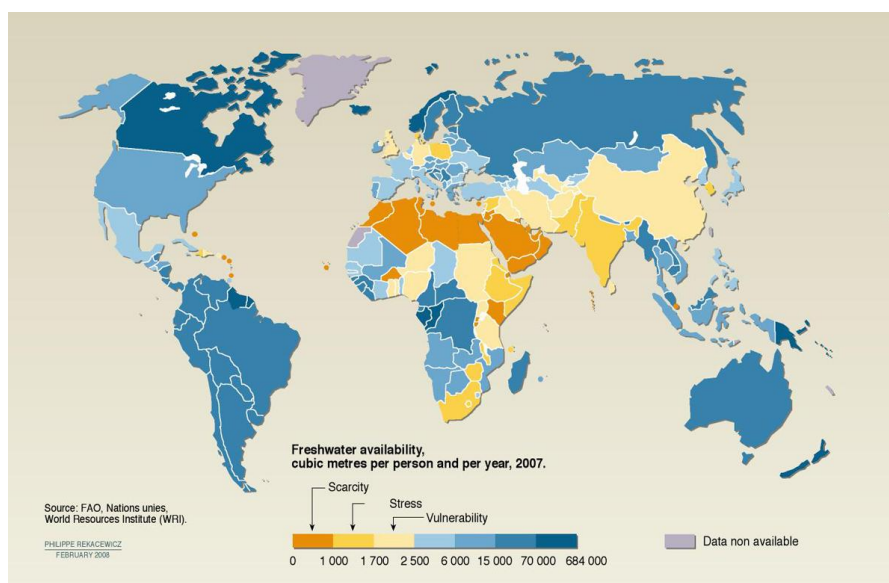


Figura 1: Mapa disponibilidad de agua dulce por persona y año, 2007 (FAO, Naciones Unidas y WRI).

Por otro lado, la pequeña proporción aprovechable de agua apta para el consumo humano está sufriendo un acelerado proceso de degradación. Más del 50% de los principales ríos del planeta están gravemente contaminados o agotados. A su vez, este fenómeno da lugar al deterioro de los ecosistemas que los rodean amenazando la salud y el sustento de las personas que dependen de ellos (Word Commission on Water, 1999). De la misma manera, en las zonas en las que existe un fácil acceso a éste recurso, se realiza un consumo excesivo y poco racional.

En la siguiente tabla podemos observar el consumo de agua en diferentes países:

USOS DEL AGUA		
ESTADOS UNIDOS Uso per cápita (m3/año): 1.868 Abastecimiento (%): 13 Industria (%): 45 Regadío (%): 42 Usos/recursos (%): 19	BULGARIA Uso per cápita (m3/año): 1.545 Abastecimiento (%): 3 Industria (%): 76 Regadío (%): 22 Usos/recursos (%): 7	JAPÓN Uso per cápita (m3/año): 732 Abastecimiento (%): 17 Industria (%): 33 Regadío (%): 50 Usos/recursos (%): 16
ESPAÑA Uso per cápita (m3/año): 1.188 Abastecimiento (%): 12 Industria (%): 26 Regadío (%): 62 Usos/recursos (%): 41	EGIPTO Uso per cápita (m3/año): 1.028 Abastecimiento (%): 7 Industria (%): 5 Regadío (%): 88 Usos/recursos (%): 97	MADAGASCAR Uso per cápita (m3/año): 1.642 Abastecimiento (%): 1 Industria (%): 0 Regadío (%): 99 Usos/recursos (%): 41

Tabla 1: Consumo de agua por países.

Del escaso 1% de agua del planeta que podríamos destinar a la supervivencia humana, casi el 70% se destina a usos agrícolas, muchas veces en cultivos no adecuados para las zonas y con sistemas de riego muy poco eficientes con el subsiguiente malgasto. Le siguen el sector industrial,

Abastecimiento de Agua

que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos que requieren el 10%. Para ello, se han construido presas, canalizaciones y obras de ingeniería fragmentando el 60% de los cauces de los ríos e interrumpiendo caudales y produciendo una alteración en la cantidad y localización del agua disponible para consumo humano. Por ello el tiempo promedio que invierte una gota de un río en llegar al mar se ha multiplicado por 3. Así mismo, la deforestación y la degradación de los suelos contribuyen a la alteración del ciclo del agua ya que se altera la capa vegetal capaz de retenerla.

Hemos alterado el equilibrio global del planeta incrementando la contaminación de fuentes naturales a base de prácticas industriales poco cuidadosas y negligentes, vertidos tóxicos y falta de instalaciones de saneamiento adecuado. Aunque resulte paradójico, algunos países del Sur con poca actividad industrial, presentan mayor contaminación química que los del Norte, debido al uso incontrolado de pesticidas tóxicos en agricultura. La explicación viene dada por la necesidad de procurar alimentos a una población cada vez más numerosa, acompañada de una ausencia de normativa legal hace que se descuiden cuestiones como la salud o la conservación del suelo en la práctica de la agricultura. Como ejemplos más llamativos podemos nombrar a países como Malaisia donde unos 40 ríos se consideran biológicamente muertos, o India, en el cuál se calcula que el 70% de sus aguas superficiales están contaminadas, llegando a los usuarios sin ningún tipo de tratamiento. La industrialización incontrolada también supone una causa muy importante de contaminación de las aguas.

Aproximadamente un tercio de la población mundial depende del aprovisionamiento de aguas subterráneas y extraen alrededor del 20% del total existente en el planeta cada año, de ésta cantidad la gran mayoría proviene de acuíferos superficiales (UNDP y otros 2000). Por el contrario muchos habitantes de las zonas rurales dependen directamente de recursos hídricos subterráneos, vulnerables a diversas amenazas, como el abuso y la contaminación.

En la actualidad unos 1.200 millones de personas habitan en países con escasez de agua, cifra que podría incrementarse hasta los 3.400 millones en 2025, alrededor de la mitad de la población actual.

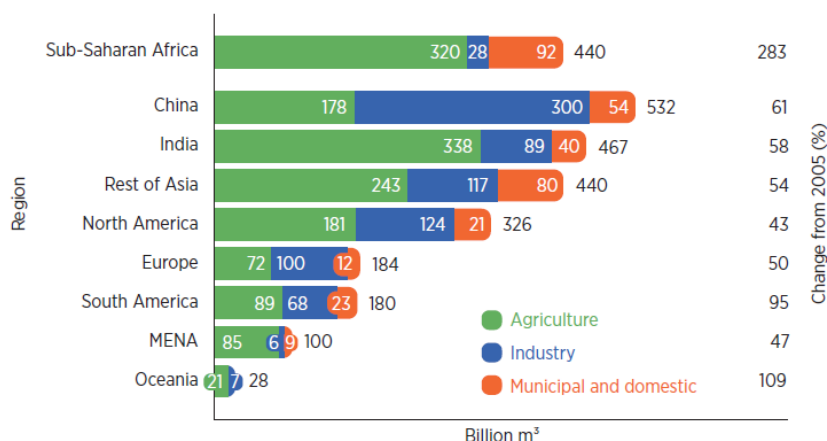


Gráfico 2: Incremento en la demanda anual de agua de 2005 a 2030 (Banco mundial basado en Water Resources group, 2009).

Los países en vías de desarrollo serán los que acojan a la población más susceptible de formar parte del mencionado grupo ya que, observando la evolución de incidentes relacionados con el clima en el Gráfico 3, se puede predecir que la humanidad entera deberá hacer frente a lluvias torrenciales y sequías históricas producidas por el cambio climático, misión que les resultará mucho

Abastecimiento de Agua

más fácil a los llamados países “desarrollados” en detrimento de los que no forman parte de este selecto grupo. Naciones Unidas señala que los efectos del cambio climático sobre el ciclo del agua de la Tierra hacen que el futuro del agua potable sea más precario que nunca.

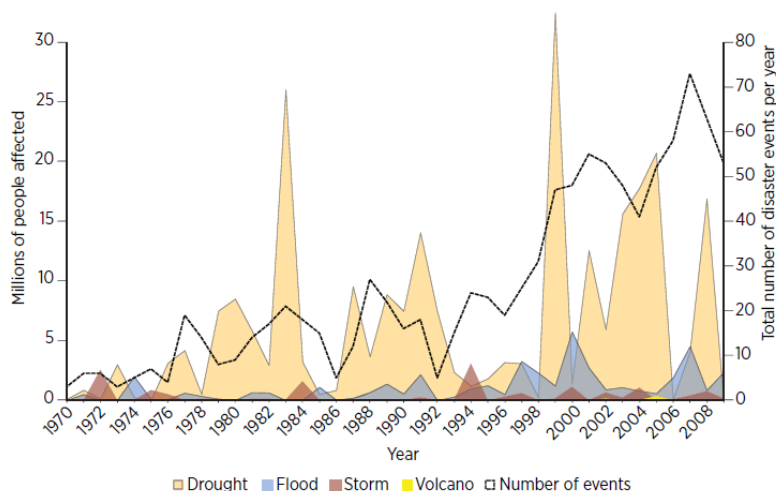


Gráfico 3: Incremento de la frecuencia e impacto de desastres naturales reportados en África (Banco Mundial 2010).

Aun con todo lo anterior, el ser humano ha sabido buscar soluciones al gran problema que supone la falta de agua. Se tiene constancia del empleo de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia hace más de 5.000 años en la región de la Mesopotamia. Desde entonces y hasta nuestros días numerosas culturas han seguido utilizando y perfeccionando estos sistemas para garantizar su supervivencia. Con la evolución de los medios de transporte en muchas regiones del planeta donde por diversos motivos no se disponía de instalaciones adecuadas para uso doméstico aparecieron las carretas-tanque y tanques cisterna que repartían y reparten agua a diversos núcleos de población. Aún en nuestros días, estos sistemas son el principal método de abastecimiento de agua fuera de las grandes ciudades en numerosos países, e incluso en ellas. Existen zonas del globo en las que estas tecnologías son aceptables para un uso doméstico pero que indudablemente están obsoletas para un uso más allá del especificado.



Ilustración 1 : Sistema abastecimiento de agua por camiones cisterna, La Habana (Cuba) en la actualidad.

Aceptando que los sistemas anteriormente descritos suponen un lastre para el desarrollo de los países que se valen de ellas respecto de los más favorecidos, no podemos olvidar aquellos que por sus condiciones geográficas, económicas o políticas ni siquiera pueden acceder ellos.

Deberíamos colaborar para que todos tuviéramos las mismas posibilidades de disfrutar de un correcto abastecimiento de agua. De entre todos los programas intervención diseñados para reducir estas desigualdades, destaca la opción del bombeo manual en regiones donde existan acuíferos aptos para su utilización. Enfocando el uso de bombas de agua manuales a dicho fin se ha experimentado un aumento de la atención prestada a este tipo de tecnologías, desarrollándose diseños específicos para cada zona donde se supone que van a ser implantadas amoldándose a los requisitos y necesidades de cada región.

3. Bombeo manual.

Al afrontar un proyecto real de tecnologías apropiadas se deben tener en cuenta los dos principios fundamentales que debe seguir todo proyecto de abastecimiento (Arlosoloff, 1987):

- El servicio que se dé a la comunidad de la tecnología escogida debe de estar dentro de dos parámetros, lo que ésta esté dispuesta a pagar por dicha tecnología y la capacidad para mantenerla en servicio.
- El nivel de servicio debe de ser sostenible y no sobreexplotar los acuíferos ni el ecosistema.

Para el abastecimiento de agua debe de existir un equilibrio entre la tecnología disponible, los recursos hídricos existentes y las capacidades organizativas y financieras de una comunidad. A continuación valoraremos varios aspectos importantes a tener en cuenta al comenzar un proyecto relacionado con el bombeo manual.

3.1. *Aguas subterráneas.*

Las aguas de origen subterráneo presentan varias ventajas respecto a otro tipo de fuentes teniendo en cuenta nuestro cometido. Presentamos a continuación algunas de ellas:

- Exige pequeñas inversiones iniciales en comparación con las de las plantas de filtros para tratamiento de aguas superficiales.
- Los problemas de abastecimiento en comunidades con un número creciente de individuos pueden ir solucionándose paulatinamente junto con el crecimiento del consumo sin necesidad de abordar grandes soluciones para un futuro a largo plazo.
- Las captaciones pueden ubicarse muy próximas al consumo con lo que se economiza en aducciones.
- Escasa evaporación.
- Por lo general no necesita tratamiento especial gracias al filtrado natural que proporciona la tierra. Basta con una pequeña cloración, cuando ésta sea posible, antes de entregar para el consumo.
- Permite solucionar problemas de abastecimiento en forma muy rápida dado el corto espacio de tiempo que, en general, se requiere para la construcción de este tipo de obras.
- En muchas zonas es el único recurso económicamente disponible.

También presentan algunos inconvenientes como la dificultad para su extracción y la falta de conocimiento en cuanto a la cuantificación y ubicación exacta de los acuíferos, así como la calidad del agua que contienen y sus mecanismos de regeneración.

Como ya hemos mencionado en el apartado anterior, es en las zonas rurales con menor densidad de población donde la dependencia de aguas subterráneas es más acusada (Postel 1997, UNEP 1999) por la falta de masa crítica para rusticar una estación potabilizadora de aguas superficiales.

Region	per cent	Population served (millions)
Asia-Pacific	32	1000 – 2000
Europe	75	200 – 500
Central and South America	29	150
USA	51	135
Australia	15	3
Africa	NA	NA
World	-	1500 – 2750

Tabla 1: Porcentaje de abastecimiento de agua obtenido de las aguas subterráneas (UNEP y otros, 2000)

Reciben el nombre de acuíferos los sustratos geológicos que presentan agua, aunque también es habitual referirnos al agua contenida en cuerpos de agua subterráneos que fluyen lentamente a través del sustrato y de los estratos profundos del subsuelo cuando usamos dicho término. En la siguiente figura podemos observar la situación de los principales acuíferos en el planeta, no necesariamente cerca de las zonas más húmedas o de donde las zonas en las que se registran lluvias más abundantes. En la actualidad muchos de ellos están amenazados por el mal uso que se está haciendo de ellos, quedando en muchos casos inutilizados por la contaminación y/o sobreexplotación.

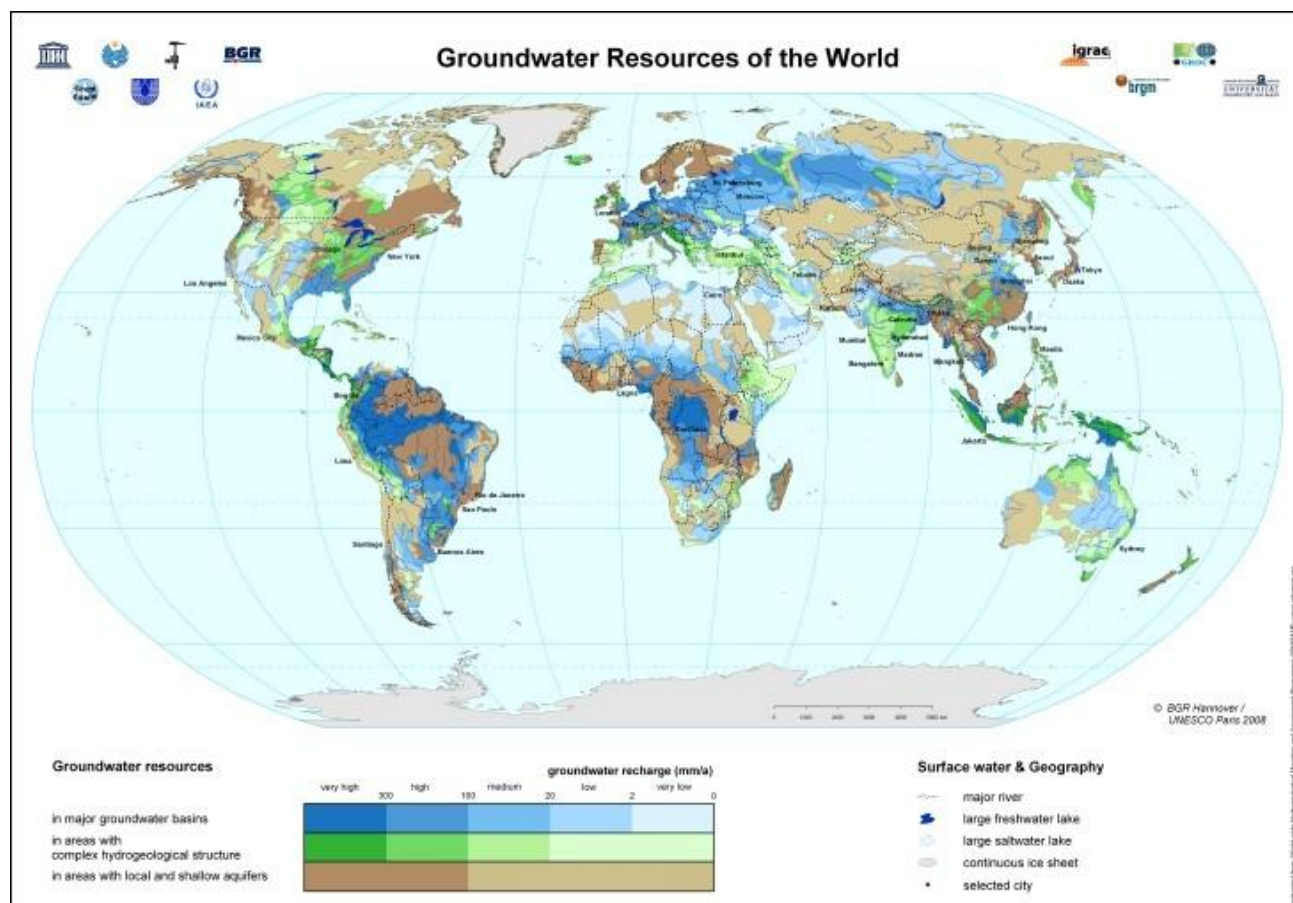


Figura 2: Situación y naturaleza de las aguas subterráneas en el planeta (UNESCO y BGR).

Así como en la mayoría de los casos el agua actúa como filtro natural, las aguas subterráneas también son susceptibles de ser contaminadas como podemos ver en la siguiente tabla:

PROBLEMAS RELATIVOS A LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	
Problemas	Causas
Contaminación antropogénica (causada por las personas)	Protección insuficiente de los acuíferos vulnerables contra los vertidos realizados por seres humanos provenientes de: <ul style="list-style-type: none"> • actividades urbanas e industriales • intensificación de los cultivos agrícolas
Contaminación que ocurre de forma natural	Relacionada con la evolución del pH-Eh de las aguas subterráneas y la disolución de minerales (agravada por la contaminación del hombre y/o la explotación incontrolada)
Contaminación en la boca de los pozos	Diseño y construcción inadecuados de pozos que permiten la penetración directa de aguas superficiales o aguas subterráneas poco profundas contaminadas

Tabla 2: Problemas relativos a la calidad de las aguas subterráneas (Foster Lawrence y Morris 1998).

El aumento de información sobre el comportamiento y situación de los acuíferos subterráneos es proporcional incremento de preocupación sobre la calidad del agua en dichas fuentes. El tratamiento inadecuado de los residuos ha conducido a incidencias de cólera, amibiasis, hepatitis A,

giardiasis y otras enfermedades. Los niveles elevados de nitratos en el agua potable pueden causar metahemoglobina en los niños pudiéndoles provocar asfixia o incluso la muerte. Por todo esto, aunque los acuíferos subterráneos son la opción normalmente escogida para abastecimientos de agua en el ámbito de la cooperación al desarrollo por la calidad del agua que contienen, se aconseja monitorizar la calidad de las aguas periódicamente para evitar problemas de contaminación, que no por poco frecuentes dejan de existir.

Por si solos los sistemas de bombeo manual no representan una amenaza para los acuíferos ya que normalmente los caudales de extracción asociados a esta técnica son demasiado bajos para tener un efecto significativo. Por el contrario, la instalación masiva de bombas hidráulicas eléctricas o diesel, de gran capacidad, ha provocado que los acuíferos no sean capaces de regenerarse produciéndose variaciones en el nivel de la capa freática e inutilizando en muchos casos pozos contiguos destinados al bombeo manual (Arlosoroff 1987) pudiendo llegar a agotar los recursos de aguas subterráneas de una determinada región.

3.2. Necesidades de consumo de Agua.

Podríamos pensar en necesidad de consumo de agua como la cantidad mínima que debe ingerir un ser humano para no sufrir deshidratación, lo que supondría la ingestión directa de alrededor de 2 litros al día en condiciones normales (temperatura y esfuerzo realizado) a parte del agua que nos aporta una correcta alimentación. Pero la realidad es que la cantidad mínima necesaria para vivir es muy superior.

La estipulación de los usos básicos del agua es aun en la actualidad un tema controvertido. La OMS en 2002 consideraba como imprescindible el agua empleada para consumo directo, preparación de alimentos y en la higiene personal, siendo estos dos últimos los usos que requieren más porcentaje del total. También existen estudios realizados por el Banco Mundial o el departamento estadounidense para el desarrollo que consideran el agua empleada para saneamiento (letrinas y cuartos de baño) como imprescindible por las enfermedades derivadas de la escasez de recursos para éste cometido.

Mecanismo de transmisión	Factores que favorecen la transmisión	Enfermedades de prevención	Medidas
Propagadas por el agua (water-borne).	El agua actúa como vehículo de transporte pasivo del elemento patógeno. La infección se produce al beber agua o al ingerir alimentos contaminados. La transmisión está relacionada directamente con la calidad del agua. Ésta se contamina por excretas o por aguas residuales.	Enfermedades diarreicas, cólera, fiebre tifoidea, polio, leptospirosis, giardiasis, amebiasis, hepatitis infecciosa.	<ul style="list-style-type: none">• Mejorar la calidad del agua.• Evitar el uso de fuentes no protegidas.• Mejorar las condiciones sanitarias.• Evitar la contaminación de los sistemas de abastecimiento.
Lavadas por el agua (water-washed).	Son enfermedades causadas por la falta de higiene o por una higiene precaria (en particular el lavado de manos), que disminuyen con un mejor acceso al agua y con mayores cantidades de agua. Su eliminación depende más de la cantidad de agua que de la calidad.	Enfermedades diarreicas (lavado de manos), enfermedades transmitidas por pulgas (tifus), infecciones por salmonela (contaminación de alimentos), sarna, anquilostomiasis (lavado de manos), micosis, infecciones oculares (tracoma, conjuntivitis), piojos, asma...	<ul style="list-style-type: none">• Aumentar la cantidad de agua disponible.• Mejorar la accesibilidad al agua.• Mejorar la higiene personal (comenzando por el lavado de manos antes de comer y

Con base en el agua (water-based).	En regiones endémicas, el mero contacto con aguas contaminadas por organismos (moluscos y copépodos) que actúan como huéspedes de ciertos parásitos es suficiente para contraer la infección.	Esquistosomiasis, dracontiasis (gusano de Guinea).	después de defecar). • Reducir el contacto con aguas contaminantes (baños, regadíos). • Control de la población de moluscos. • Protección de fuentes y pozos.
Provocadas por un insecto vector relacionadas con el agua (water-related).	Las infecciones son transmitidas por insectos que se reproducen en el agua o pican en su proximidad.	Paludismo (mosquito), fiebre amarilla (mosquito), dengue (mosquito), oncocercosis (mosca), filariasis (mosquitos), enfermedad del sueño (mosca).	• Mejorar el almacenamiento de las aguas superficiales. • Destruir los lugares de reproducción de vectores. • Disminuir la necesidad de frecuentar los lugares de reproducción. • Transportar el agua hasta los lugares por conducciones cerradas.

Tabla 3: Clasificación de las enfermedades infecciosas relacionadas con el agua según su mecanismo de transmisión (Rogeaux 1993).

Distintas organizaciones involucradas en proyectos de desarrollo han definido esta “necesidad básica de agua” en 50 litros por persona y día para uso doméstico como cantidad aceptable para evitar afecciones relacionadas con la escasez. En éste valor no se incluyen otros usos necesarios para el desarrollo como la agricultura, la protección de los ecosistemas o la industria y que elevaría ésta cifra a un mínimo de 100 litros por persona y día. (OMS y UNICEF, 2000).

Tristemente las diferencias entre los consumos de las comunidades más y menos favorecidas son desmesuradas. En los países del llamado “primer mundo” el nivel de consumo de agua per capita, a nivel doméstico, sin contar consumos industriales o de agricultura supera los 250 litros por persona y día. En España, por ejemplo, Water Footprint cifra el consumo en 267 litros por persona y día.

	RENTA ALTA	RENTA BAJA	MEDIA MUNDIAL	ESPAÑA
AGRICULTURA	40	80	65	62
INDUSTRIA	45	10	25	25
CONSUMO HUMANO	15	10	10	12

Tabla 4: Distribución del uso en porcentajes del agua total usada por los países según su renta per cápita (OMS).

ÁREA GEOGRÁFICA	CONSUMO	
	m ³ /hab.-año	l/hab.-día
AMÉRICA DEL NORTE Y CENTRAL	1.874	5.134
EUROPA	1.290	3.534
OCEANÍA	887	2.430
ASIA	529	1.449
AMÉRICA DEL SUR	485	1.329
ÁFRICA	250	685
MEDIA MUNDIAL	657	1.800
ESPAÑA	1.201	3.290

Tabla 5: Consumo de agua absoluto por habitante en las diferentes zonas del planeta (OMS, 1996)

La calidad de un abastecimiento de agua o nivel de servicio se mide en función de los siguientes parámetros:

- Caudal de agua capaz de suministrar en un tiempo reducido.
- Capacidad de bombeo del pozo.
- Distancia entre la fuente y el consumo.
- Disponibilidad o días de funcionamiento al año.

A continuación se muestran los distintos niveles de abastecimiento de agua y sus consecuencias sobre la salud. Destaca en estos datos que igual de importante que proporcionar una fuente segura y abundante de agua es que la misma esté situada en un punto cercano a la vivienda o usuario. Son muchos los casos documentados de proyectos que fracasan porque el punto de suministro mejorado está más alejado que la fuente tradicional y no se consigue que la población cambie sus hábitos de consumo.

<u>Nivel del servicio</u>	<u>Medición del acceso</u>	<u>Necesidades atendidas</u>	<u>Nivel del efecto en la salud</u>
Sin acceso (cantidad recolectada generalmente menor de 5 l/r/d)	Más de 1.000 m ó 30 minutos de tiempo total de recolección	Consumo Higiene no garantizada (a no ser que se practique en la fuente)	Muy alto
Acceso básico (la cantidad promedio no suele superar los 20l/r/d)	Entre 100 y 1.000 m ó de 5 a 20 minutos de tiempo total de recolección	Consumo El lavado de manos y la higiene básica de la alimentación es posible; es difícil garantizar la lavandería y el baño a no ser que se practique en la fuente	Alto
Acceso intermedio (cantidad promedio de aproximadamente 50 l/r/d)	Agua abastecida a través de un grifo público; o dentro de 100 m ó 5 minutos del tiempo total de recolección)	Consumo La higiene básica personal y de los alimentos está asegurada; se debe asegurar también la lavandería y el baño	Bajo
Acceso óptimo (cantidad promedio de 100 l/r/d y más)	Agua abastecida de manera continua a través de varios grifos o menos de 5 minutos de recolección total	Consumo Se atienden todas las necesidades Higiene	Muy bajo

Tabla 6: Nivel de servicio de agua en relación con la accesibilidad, las necesidades atendidas y los efectos en la salud (OMS 203).

También presentamos los datos de la cobertura de servicios de abastecimiento de agua según la situación económica de cada país:

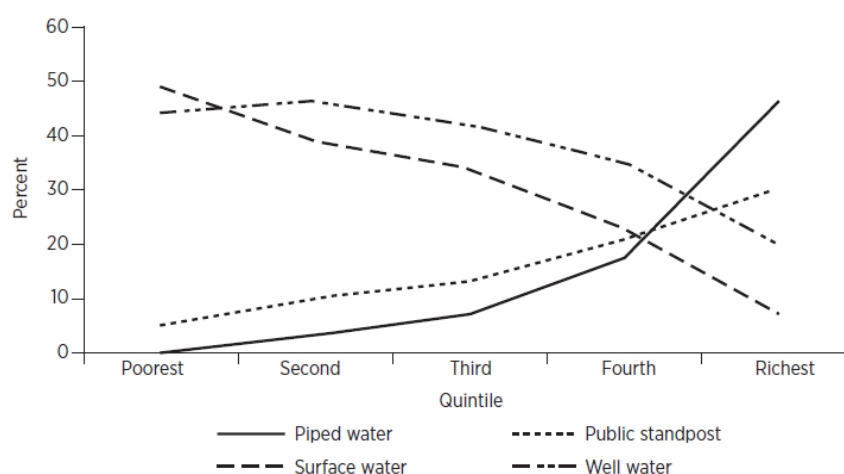


Gráfico 4: Cobertura de servicios de abastecimiento de agua según riqueza de los países (AICD, 2011).

De acuerdo a los estudios consultados se considera como imprescindible un nivel de servicio superior a 20 litros día recolectados en menos de media hora, aceptable un volumen de 50 litros en cinco minutos y aconsejable un total de 75l por persona día recolectados en un tiempo no superior a 5 minutos (Tomillo 2006). Estando el nivel óptimo en cualquier valor por encima de 100l. Las experiencias previas en proyectos con bombas manuales indican que los niveles de servicio obtenidos, oscilan entre los 10 y 40l por persona día (Arlosoloff 1987) aunque la capacidad de abastecimiento tomado en los proyectos como valor de diseño oscila entre los 50 y los 75l persona día. Valor suficiente para dotar a la instalación del nivel de servicio adecuado independientemente de los hábitos de consumo de la comunidad.

Normalmente el abastecimiento de agua de una familia lo realizan una o dos personas, tradicionalmente en los países en desarrollo el abastecimiento de agua es una labor de las mujeres y

niños, por lo que cada persona debe bombear agua suficiente para toda la unidad familiar (6 personas de media), lo cual eleva el volumen de bombeo a 350 – 600l. Por lo tanto una mujer, encargada de suministrar el agua, teniendo en cuenta que una bomba manual tiene una caudales de unos 20 l/min, que la bomba está a 5min de su hogar y que puede acarrear 50l por viaje tarda entre 87,5 y 150min en abastecer a su familia de agua.

$$t_{abastecimiento} = V_{bombeo} / Q_{bomba} + t_{desplazamiento}$$

Tampoco podemos olvidar los aspectos económicos, sociales y políticos de la necesidad de consumo de agua. Las cuencas fluviales y otras masas de agua no respetan las fronteras nacionales. Así, por ejemplo, la utilización del agua por un país situado aguas arriba suele ignorar el suministro disponible para los países situados aguas abajo. En los albores del siglo XXI se vislumbra el peligro creciente de conflictos armados por el acceso a suministros de agua dulce.

Es preocupante observar los costos del agua en diferentes partes del mundo, en Malasia un metro cúbico de agua cuesta \$20 USD, en cambio en los EE.UU. el costo es de \$0.10-0.15 USD lo cual indica que un país pobre paga hasta 200 veces más que un país rico. El agua embotellada ha alcanzado valores por litro mayores a los de la leche y la gasolina; por lo que puede considerarse que la ya mencionada creciente escasez del agua traerá catástrofes de nivel internacional como son: guerras, hambrunas, miseria y migración.

3.3. *Concepto VLOM.*

El concepto VLOM (Village Level Operation and Maintenance) significó el desarrollo de la tecnología tradicional de bombeo a tecnología apropiada. Es decir, el concepto VLOM supuso la adaptación o el desarrollo de bombas manuales desde un enfoque técnico del primer mundo a un enfoque técnico de los países empobrecidos. Antes de 1980 casi todas las bombas manuales eran modelos derivados de los modelos existentes a principios del siglo XX y empleados mayoritariamente en los países industrializados. Sin embargo en la actualidad las bombas manuales son fruto de un intenso desarrollo que ha generado una nueva serie de bombas VLOM, “apropiadas” para su empleo en países en desarrollo.

El desarrollo del concepto VLOM fue una de las primeras consecuencias del proyecto “Rural Water Supply, Handpump Project”. La aplicación de tecnologías del primer mundo para resolver los problemas de suministro en el tercer mundo provocó que muchos de los proyectos realizados quedaran abandonados al poco de su inicio por falta de medios para sostener el sistema en funcionamiento. Tanto las tecnologías más modernas como las bombas manuales de los países desarrollados se mostraron en muchas ocasiones ineficaces como solución para la problemática existente en los países en desarrollo, que requería un enfoque específico.

En un principio el concepto VLOM estuvo orientado al desarrollo de una tecnología apropiada según los siguientes principios:

- El mantenimiento se podrá realizar con herramientas comunes, bajo nivel técnico por una persona formada al efecto denominada “village caretaker”.

Bombeo manual

- Las tecnologías escogidas se fabricarán en la medida de lo posible dentro del país de manera que se asegure la accesibilidad a piezas de repuesto.
- Se primará la disponibilidad frente a la robustez o durabilidad. Es decir, es mejor un sistema que se estropee cada 6 meses y se pueda reparar en un par de días que un sistema que un sistema que se estropee cada 12 meses pero que el tiempo de reparación supone más de una semana.
- Bajo coste, tanto inicial como de operación.

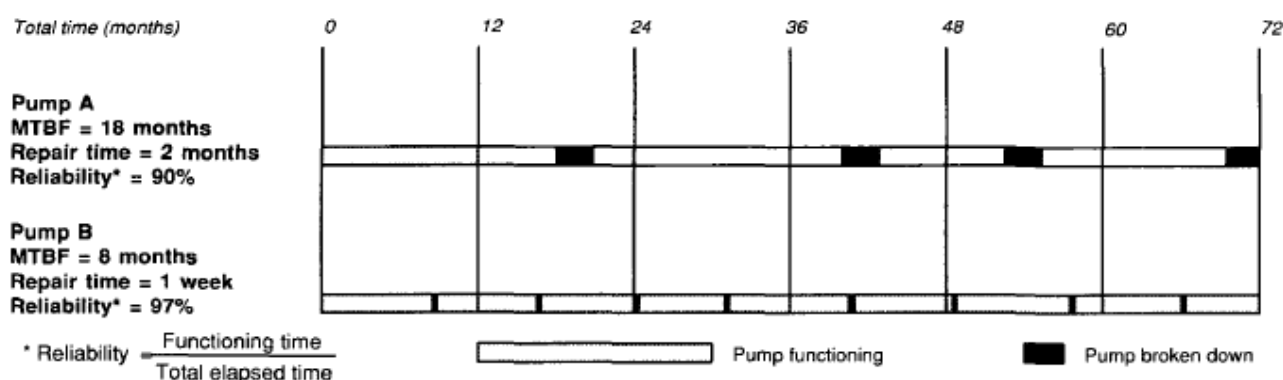


Figura 3: Disponibilidad (reliability) frente a durabilidad (Arlosoroff, 1987).

También se observó que la misma tecnología funcionaba mejor en unos países o regiones que en otras y que los proyectos que tenían éxito compartían que la comunidad beneficiaria era parte activa en el mismo. De esta forma se añadió al concepto VLOM un nuevo enfoque más amplio y no solo basado en la tecnología:

- La comunidad beneficiada será informada e involucrada desde el principio de las diversas opciones disponibles (¿Dónde? ¿Cuándo? ¿Quién?).
- Participará en la medida de sus posibilidades en la financiación del proyecto.
- Se le ofrecerán posibilidades de mayor nivel de servicio pero deberán pagar el sobre coste que esto implica
- La comunidad elegirá el tipo de mantenimiento que desee y quien lo realizará.
- La comunidad deberá ser capaz, y pagará todas las reparaciones que hagan falta una vez puesto en marcha el sistema.

La aplicación del concepto VLOM produjo un aumento considerable en el éxito de los proyectos de abastecimiento. Se pasó de un 25 – 50% de equipos operativos a un mismo tiempo en la década de los 70 a alcanzarse un 80 – 90% en proyectos VLOM durante la década del agua (1980-90).

3.4. *Tecnologías para la Captación de Aguas Subterráneas.*

Existen varias opciones tecnológicas susceptibles de cumplir los principios VLOM, en este apartado se va a describir cada una de ellas, su potencial y capacidad como solución al problema de abastecimiento en comunidades que por deferentes motivos necesitan un método de captación de aguas subterráneas para el abastecimiento.

3.4.1. Acceso al Agua. Pozos.

Tan importante como la tecnología de bombeo empleada es la construcción de un pozo que permita la accesibilidad al agua. Los conceptos VLOM también se han extendido a la perforación y excavación de pozos. Desgraciadamente esta fuera del alcance del proyecto un estudio detallado de las distintas tecnologías implicadas. Tan solo apuntar que la posibilidad o elección de un tipo de pozo u otro condiciona tanto los costes del proyecto, como las tecnologías de bombeo aplicable, e incluso la contaminación o no del acuífero.

Bombeo manual

	Cavado manual	Perforación manual	Equipo de perforación con cable	Perforadora rotativa pequeña	Perforadora rotativa de usos múltiples
Gastos de inversión aproximados en dólares estadounidenses	\$1.000	\$1.000-5.000	\$20.000-100.000	\$100.000-250.000	\$200.000-500.000
Costo de operación	muy bajo	bajo	bajo	mediano	muy elevado
Capacitación operativa	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Aptitudes para las reparaciones	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Respaldo complementario	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Tasas aproximadas de penetración en metros por cada día de 8 horas de trabajo	0,1-2,0m	1-15m	1-15m	20-100m	20-100m
Pozos de 200 mm* de diámetro a 15m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	veloz	veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro a 50m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	lento y difícil	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones semi consolidadas	-	imposible	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 100 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones consolidadas (duras, no las de grava apisonada)	-	imposible	muy lento	muy veloz**	muy veloz**
* pozos de 200 mm para construir un pozo de 100 mm de diámetro tras la instalación de filtros el apisonamiento de la grava. ** supeditado al apoyo logístico					
De: Arlosoroff, S., et al, Community Water Supply, The Handbomba Option, PNUD/Banco Mundial					

Tabla 7: Tecnologías de construcción de pozos (UNICEF 1999).

3.4.1.1. Pozos y bombeo manual.

Ante la variedad de tecnologías existentes para la construcción de pozos se deben valorar aspectos como el tipo de terreno, la profundidad de la capa freática y los medios técnicos disponibles para una correcta elección del modo de perforación. Según el concepto VLOM se debe buscar la opción que implique en mayor medida a la comunidad pero sin que esto perjudique al funcionamiento global de la instalación.

Una de las ventajas que presenta el bombeo manual es que en la mayoría de los casos podremos utilizar indistintamente pozos perforados o excavados únicamente realizando pequeñas modificaciones, para la instalación de los dispositivos de extracción.

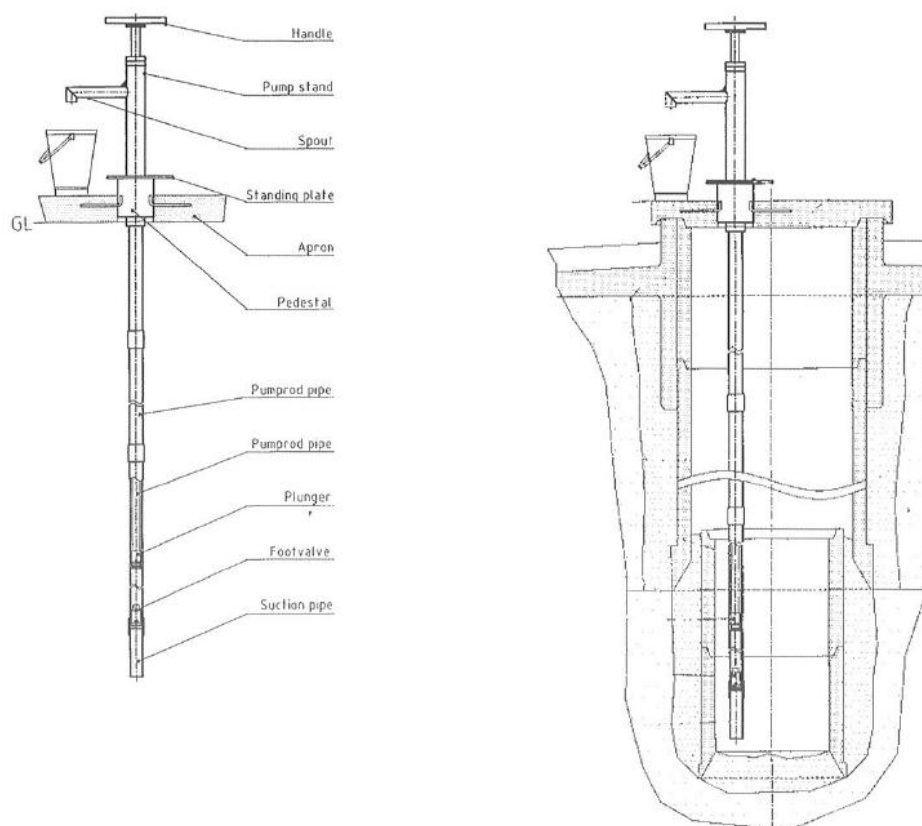


Figura 4: Instalación en pozo perforado/Instalación en pozo excavado (Anexo 2).

Lo que si podemos considerar un parámetro fundamental para el diseño del pozo es la profundidad a la que debe situarse el pistón de la bomba manual que queramos instalar en el. Depende del tipo de bomba, del terreno y del tipo de pozo. Como podemos ver en la Figura 4 se definen dos niveles de agua, el nivel estático (Static Water Level) que es el nivel de la capa freática en la estación seca y el nivel dinámico de agua (Dinamic Water Level) que sirve para contabilizar el descenso de nivel al producirse bombeo. El valor del DWL, también conocido por PWL (Pumping Water Level) oscila según la permeabilidad del terreno, el tipo de pozo en el que nos encontremos y el caudal bombeado. También se conoce como factor de recarga.

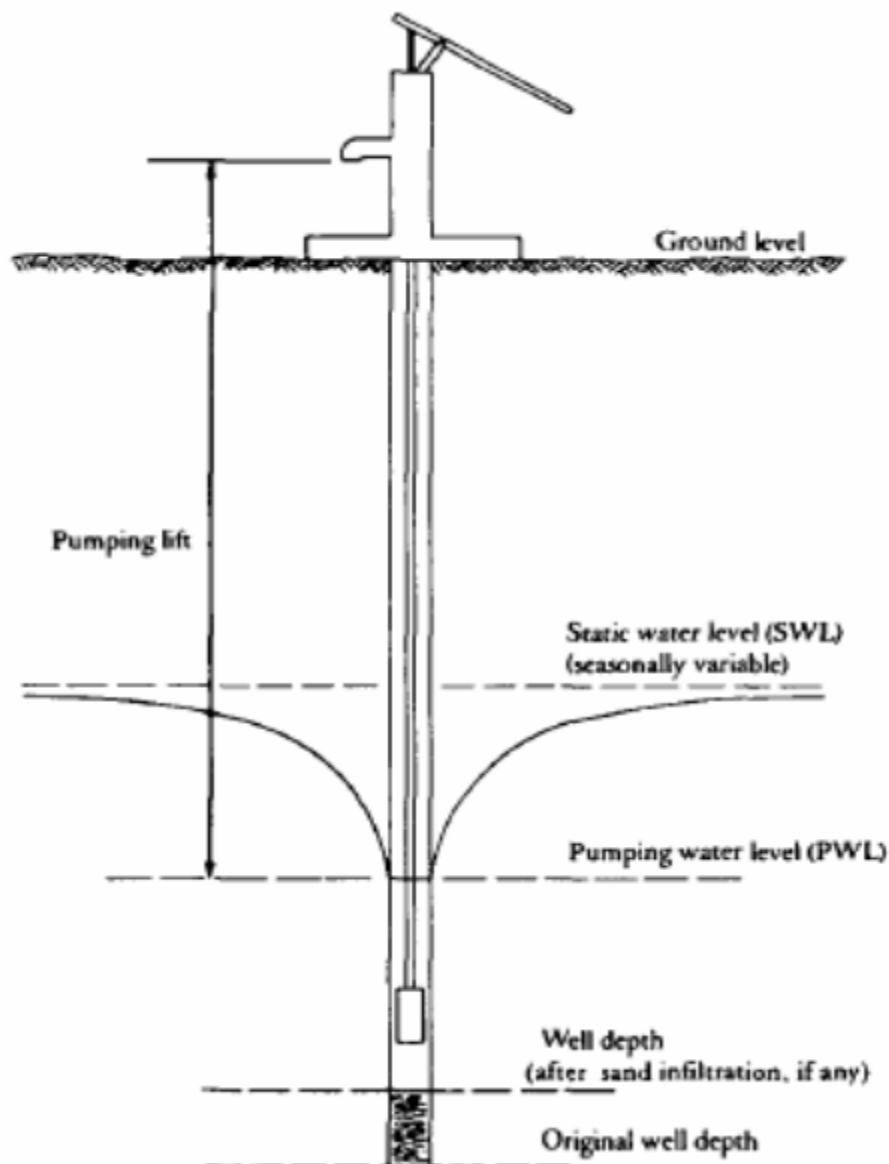


Figura 5: Niveles de agua subterránea (Reynolds, 1992).

Es difícil encontrar documentación que aconseje una diferencia mínima entre la posición del pistón y el DWL o el SWL. Generalmente se recomienda dejar la mayor profundidad posible. A modo orientativo se puede aventurar que la diferencia no debe ser menor a un metro respecto al DWL en pozos excavados, y superior a 5 – 6 metros en caso de pozos perforados si la permeabilidad del terreno es alta.

3.4.2. Tecnologías de bombeo.

En este apartado procedemos a la enumeración y descripción de los diferentes tipos de bombas usadas para la extracción de aguas subterráneas empleadas en la actualidad:

- Bombas manuales de succión:

Tienen un cilindro dentro del cuerpo de la bomba. El agua es succionada por la depresión creada por el pistón. La profundidad máxima de bombeo es de 10 metros.

Su producción no requiere de grandes capacidades técnicas por lo que se pueden producir fácilmente en países en vías de desarrollo. Son fáciles de instalar y no requieren herramientas especiales. Por su bajo precio y necesidad de mantenimiento se suele recomendar para grupos de usuarios de no más de 50-7 usuarios por bomba.

- Bombas manuales de acción directa:

Basan su funcionamiento en una varilla hueca unida a un pistón directamente accionada por el usuario. El cuerpo de la bomba suele estar hecho de acero y la varilla de plástico. Se caracterizan por ser resistentes a la corrosión. Fueron específicamente concebidas para su fabricación en países en vías de desarrollo. Su instalación es sencilla y no requiere herramientas especiales. Este tipo de bombas tiene un potencial excelente para su mantenimiento a nivel local, VLOM. No recomendada para profundidades superiores a 12 metros. Existen diseños aptos para comunidades de hasta 300 individuos.

- Bombas manuales de pozo profundo:

Son en su mayoría bombas accionadas con palanca aunque también existen de rueda y de pie. Pueden tener o no el cilindro accesible dependiendo de los diámetros empleados. Los requerimientos de material son más exigentes. Requieren una buena base industrial y un mercado amplio para justificar su fabricación. Dependiendo del diseño, puede requerir herramientas especiales y preparación para su instalación. Los nuevos diseños son de fácil reparación y mantenimiento. No resistentes a la corrosión si se emplea acero galvanizado. Para instalaciones a cielo abierto y/o muy profundas es necesario un sistema auxiliar de sujeción.

- Bombas hidroeléctricas:

Representan una buena opción cuando la red eléctrica de un país lo permite. El caudal es proporcional al diámetro de la tubería instalada, acorde con la potencia del motor eléctrico asociado. Requieren de un tanque de almacenamiento para atender los picos de demanda y las faltas de suministro eléctrico. Puede llevar asociada la instalación de una red de abastecimiento. Hace falta personal especializado para su implantación y reparación aunque requieren de muy poco mantenimiento. Los costes oscilan en función de la distancia a la línea eléctrica, el tamaño de la red de abastecimiento y el tipo de depósito asociado. Por norma general oscilan entre \$40.000 y \$70.000. Los costes O&M varían entre \$0,80 y \$1,5. Se debe comprobar si el acuífero del que se extrae el agua tiene capacidad suficiente.

- Bombas con generador diesel:

Consisten en un motor de combustión interna tipo diesel directamente acoplado a una bomba o a un alternador que alimenta una bomba hidroeléctrica. Suele ir acompañada de un almacenamiento intermedio y una red de distribución. Requieren la atención constante de un operario, mantenimiento continuo y un fácil y seguro acceso a repuestos y combustible. Los costes oscilan en función del tamaño de la red de abastecimiento y el tipo de depósito asociado. Por norma general oscilan entre \$40.000 y \$70.000. Los costes O&M varían entre \$0,50 y \$2,5. Se debe comprobar si el acuífero del que se extrae el agua tiene capacidad suficiente.

- Bombas con paneles fotovoltaicos:

Existen dos tipos de bombas solares fotovoltaicas. El primero, mediante un inversor funciona con una bomba AC hidroeléctrica sumergida, el segundo opera directamente con una bomba DC. La bomba funciona automáticamente cada vez que el sol lo permite. Requieren de un depósito intermedio y es aconsejable la instalación de una red de distribución. Necesitan poco mantenimiento y ningún repuesto aunque se aconseja un operario bien entrenado para esta tarea, además de apoyo de técnicos especializados del primer mundo para reparar o reponer los equipos averiados. Los costes oscilan en función del tamaño de la red de abastecimiento, la profundidad del pozo y el tipo de depósito asociado. Por norma general oscilan entre \$35.000 y \$70.000. Los costes O&M varían entre \$0,80 y \$1,5. Se debe comprobar si el acuífero del que se extrae el agua tiene capacidad suficiente.

- **Bombas eólicas:**

Las bombas eólicas normalmente tienen un rotor o molino con varios álabes de acero, que a través de una caja reductora mueven directamente un pistón o un mecanismo de bombeo. Resultan algo caras para la potencia que desarrollan. Requieren de un depósito de agua para asegurar el suministro y satisfacer los picos de demanda. Suelen llevar asociada una red de distribución de agua. Apta únicamente para lugares donde el viento sea suficiente en cantidad e intensidad. Necesitan poco mantenimiento y ningún repuesto aunque se aconseja un operario bien entrenado para esta tarea. En caso de avería sería necesaria la intervención de técnicos especializados. Los costes oscilan en función del tamaño de la red de abastecimiento y el tipo de depósito asociado. Por norma general oscilan entre \$35.000 y \$60.000. Los costes O&M varían entre \$0,80 y \$1,5. Se debe comprobar si el acuífero del que se extrae el agua tiene capacidad suficiente.

3.4.3. Conclusiones.

A lo largo de estas primeras páginas hemos recopilado gran cantidad de información relacionada con todo lo que envuelve el consumo humano de agua. Por desgracia, basándonos en los datos recogidos procedentes de organismos internacionales, se puede observar que la escasez del líquido elemento es uno de los factores que originan a la vez que desembocan en las grandes diferencias entre las áreas del globo más y menos favorecidas.

En las regiones más pobres los habitantes deben dedicar prácticamente el total de la poca cantidad de agua de la que disponen para uso doméstico (no siendo suficiente el total en algunos casos) volviéndose así extremadamente complicado el progreso económico de la región mediante agricultura y ganadería, tornándose imposible la creación de cualquier tipo de industria. Estas dificultades ralentizan o detienen el desarrollo de los países que las sufren eliminando la posibilidad de invertir en abastecimiento de aguas y cerrando un círculo del que es tremendamente difícil escapar. Sin embargo, la rueda gira en sentido contrario en los países ricos.

Debemos trabajar juntos para lograr minimizar estas diferencias en la medida de lo posible empezando por tratar de garantizar abastecimiento mínimo necesario a la mayoría de los habitantes de la tierra y ahí es donde son especialmente importantes las tecnologías de bombeo manual. El índice de éxito de los proyectos con bomba manual suele ser mayor que el de otras opciones debido a su sostenibilidad y el alto grado de aceptación que consigue en las comunidades beneficiarias. Según la SKAT, las bombas manuales son la mejor alternativa cuando se empieza a desarrollar un sistema de abastecimiento de agua, y sólo recomiendan una tecnología superior cuando la comunidad se exprese a favor y asuma los retos económicos y organizativos que la instalación de esta supone. Una

vez más el uso de tecnología apropiada y las directrices VLOM resultan una guía indispensable para éxito.

Creyendo haber justificado ya la realización de éste proyecto, sin más, comenzamos a adentrarnos en profundidad en el conocimiento de la bomba manual de acción directa tipo MALDA.

4. Información preliminar relativa a la bomba.

4.1. *Evaluación inicial.*

- Fabricante:

Meera & Ceiko Pumps Pvt. Ltd.
4-3-161, 2153/5, Hill Street
Ranigunj, Secunderabad,
500 003, A.P. INDIA
Tel.: + 91 40 27615131, 27617098, Fax: + 91 40 27614376
E-mail: hyd1_meera@sancharnet.in
Website: www.meera-ceiko.com

- Modelo: MALDA

La bomba manual MALDA es una bomba de pistón, de acción directa. Su uso está recomendado para profundidades entre 5m y 12m, pudiendo llegar hasta los 15m. Es una bomba de dominio público.

La fabricación, operación y mantenimiento de esta bomba sigue los principios VLOM y goza de muy buena popularidad en las regiones ahí donde ha sido empleada.

Su precio es de \$186 con material para su instalación a 6m de profundidad sin considerar gastos de envío.

Al ser una bomba manual de desarrollo relativamente reciente no se encuentra mucha información acerca de posibles fabricantes y/o distribuidores.

Para más información acerca de selección y compra de bombas manuales se recomienda la lectura de “Technology Selection and Buyer’s Guide for Public Domain Handpumps for Drinking Water”, publicado por la SKAT, 2002.

4.2. *Especificaciones técnicas.*

En este apartado únicamente se van a esbozar las características fundamentales de la bomba, para más información se pueden consultar las especificaciones técnicas de la SKAT de dominio público: “Malda Handpump Specification. Revision 2-2005” (Anexo 1).

La MALDA es una bomba de acción directa, especialmente recomendada para profundidades entre 5 y 12m, pudiendo operar hasta 15m de profundidad. El funcionamiento de las bombas de acción directa está basado en el empleo de varillas ligeras, de gran diámetro que distribuyen la aplicación del esfuerzo a las dos carreras, siendo el principal el realizado al bajar el pistón. Este

Información preliminar relativa a la bomba

modelo de bomba presenta un excelente potencial VLOM tanto en manejo y reparación como en su fabricación.

Como podemos ver en las figuras a continuación, su funcionamiento es sorprendentemente simple. La bomba consta de dos válvulas, una fija y otra móvil entre las cuales se encuentra la cámara de compresión. La pieza que agarramos para accionar la bomba se mueve solidaria a la varilla, a la que se encuentra fijada la válvula móvil.

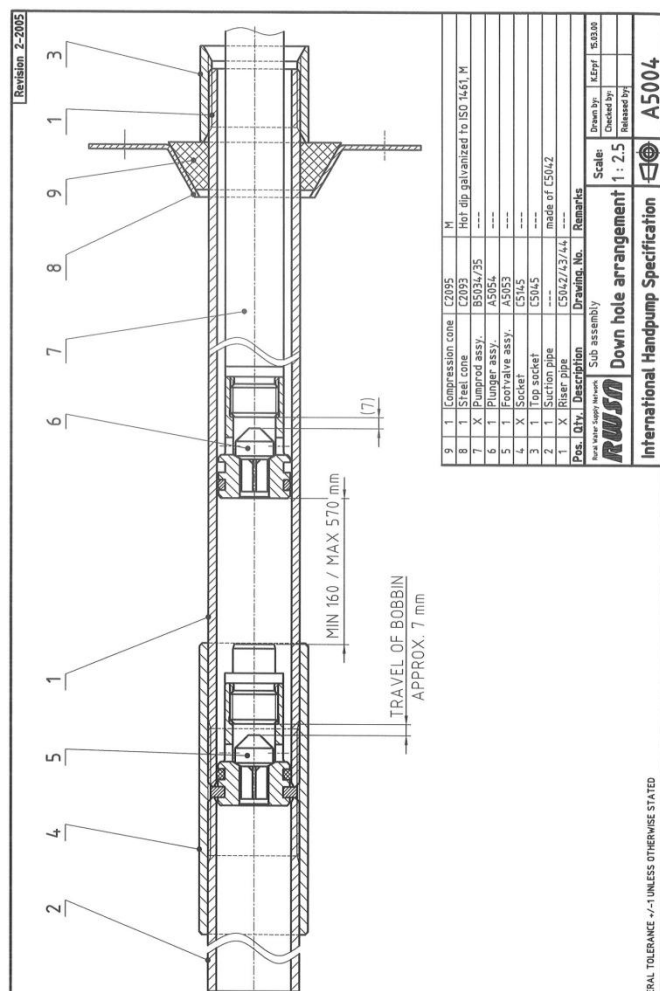


Figura 6: Detalle de la cámara de compresión y las válvulas.

Cuando realizamos la carrera de subida disminuimos la presión en la cámara de compresión hasta el punto en el que ésta es menor a la que se encuentra en el exterior de las tuberías de succión y ascensión, lo que produce el cierre de la válvula móvil y la apertura de la válvula fija, situada en la parte de debajo de la cámara y así se da lugar el flujo de agua desde el pozo al interior de la bomba.

En el momento en el que comenzamos la carrera de bajada producimos una sobrepresión en la cámara de compresión que hace que se cierre la válvula fija y se abra la móvil, permitiendo que el agua pase de la cámara a la tubería de ascensión.

Cabe destacar que aunque claramente en la carrera de subida la válvula móvil empuja hacia arriba la columna de agua de la tubería de ascensión, la carrera de bajada también propicia este fenómeno. La explicación viene dada por el hecho de que en el interior la columna de ascensión se encuentra la varilla. Esto hace

que, básicamente, el volumen de fluido que se encuentra en la cámara, que es un

cilindro, pase a la tubería de ascensión, que es una corona de cilindro con un diámetro exterior igual que el diámetro de la cámara. De este modo la altura del agua en la corona de cilindro con un volumen equivalente al inicial (cámara de compresión) debe ser mayor que la altura de la cámara de compresión (justo antes de la carrera de bajada de la válvula móvil).

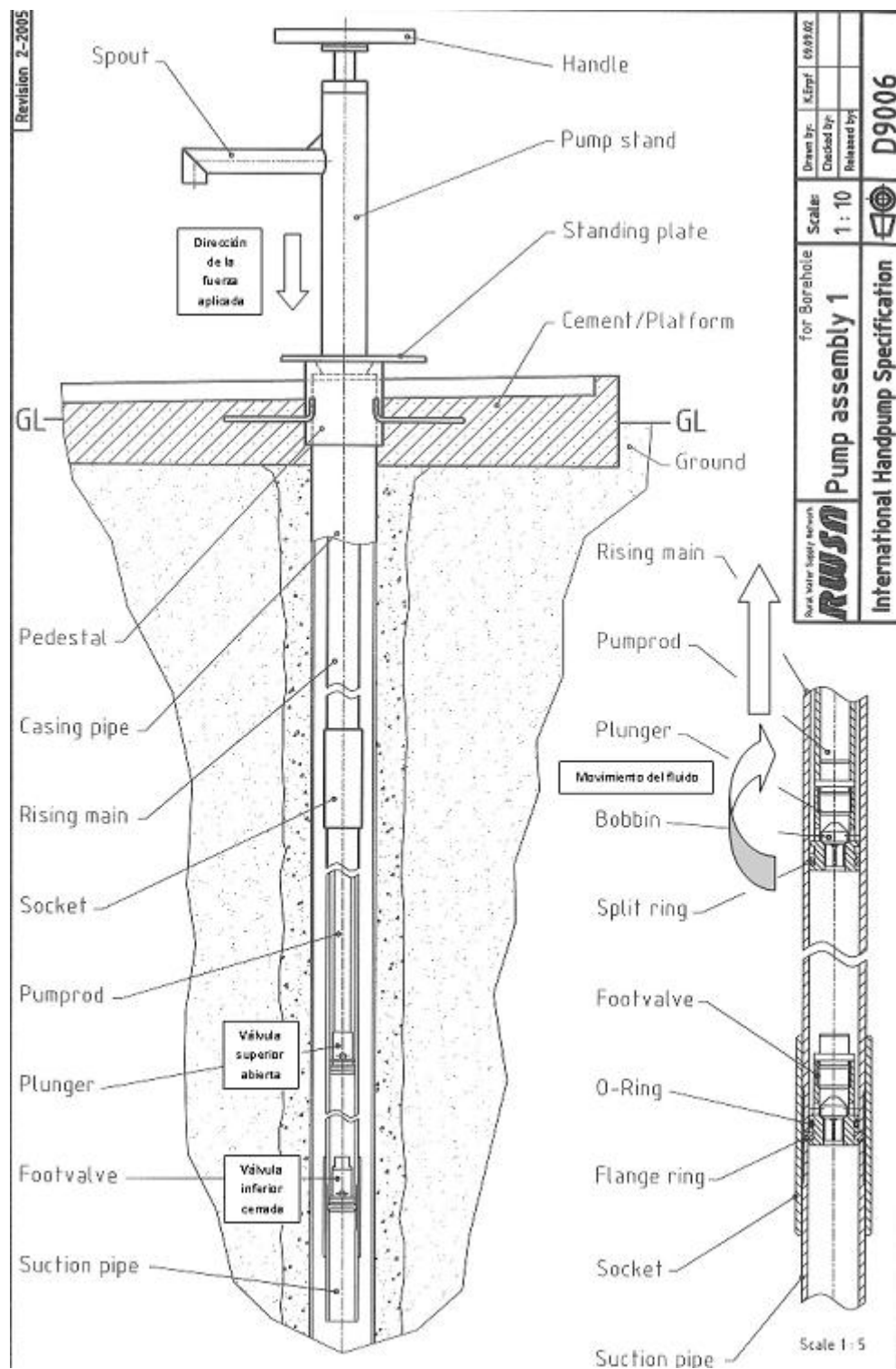


Figura 7: Detalle del funcionamiento de la bomba en la carrera de bajada.

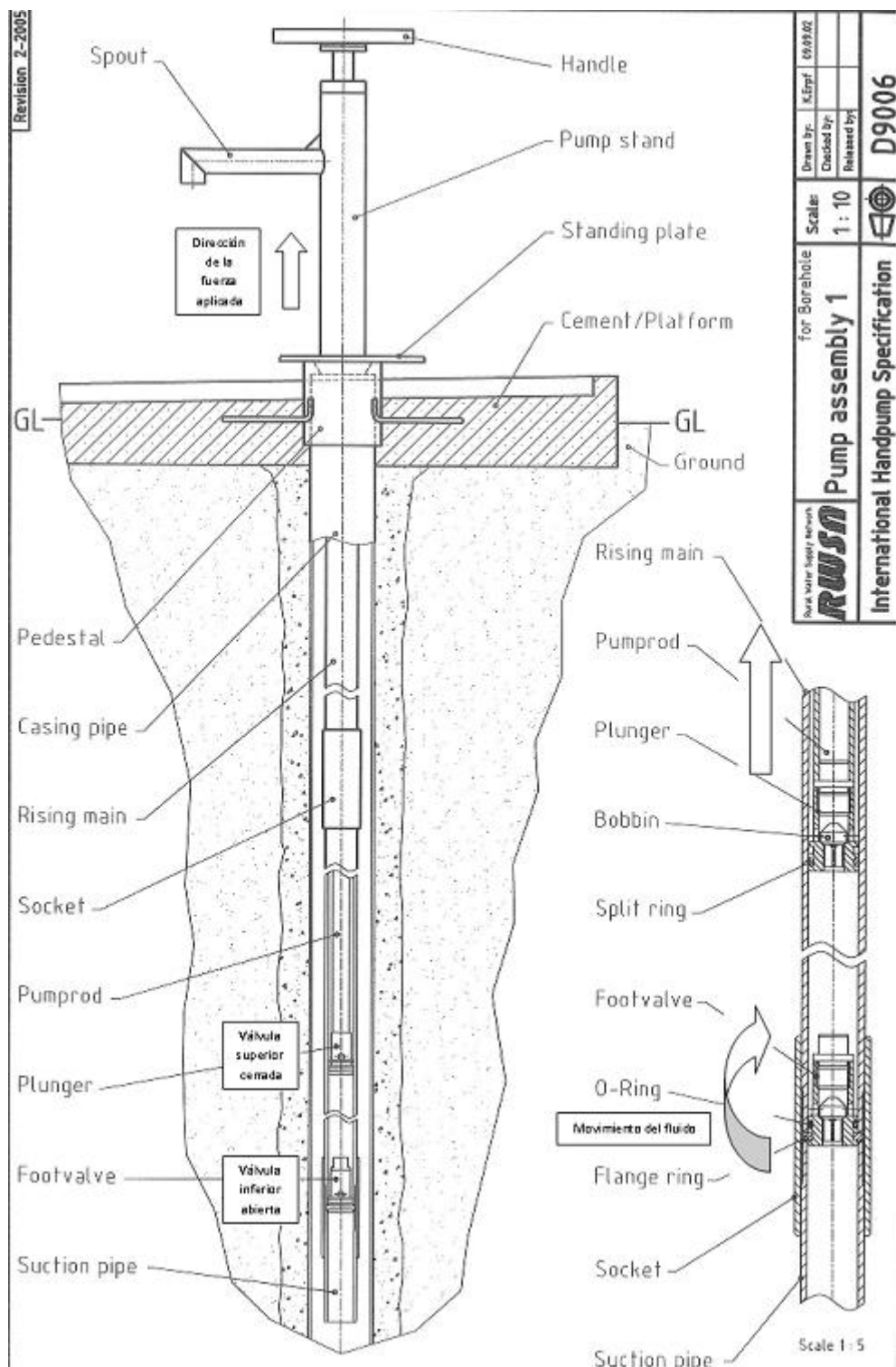


Figura 8: Detalle del funcionamiento de la bomba en la carrera de subida.

Se podría decir que el secreto de la MALDA consiste en que no posee una varilla maciza y pesada como la mayoría de las bombas de mano, en su lugar posee una tubería ligera y hueca. Esto hace que exista una fuerza que contrarreste el peso de la varilla y la columna de agua en la carrera de bajada, la fuerza de flotación. De esta manera es eficiente aplicar la fuerza directamente sobre la varilla ya que, en la carrera de subida el usuario tiene que levantar mucho menos peso que el que tendría que levantar si la varilla fuese más fina y pesada.

Información preliminar relativa a la bomba

- Datos técnicos:
 - Diámetro del pistón: 50 mm
 - Carrera del pistón: 410 mm
 - Caudales aprox. (75W): a 5 m 3,5 m³/h
 - a 10 m 1,8 m³/h
 - a 15 m 1,2 m³/h
 - Rango de profundidades: 2 – 15 m
 - Usuarios por bomba: 300 aprox.
 - Nivel de abastecimiento: 15 – 20 litros/persona día
 - Tipo de pozo: Excavado ó perforado
- Materiales:
 - Cuerpo de la bomba: acero galvanizado
 - Accionador: acero galvanizado
 - Forro del accionador: acero inoxidable
 - Varilla: tubería HDPE
 - Tuberías: tubería HDPE
 - Cilindro del pistón: HDPE
 - Pistón: HDPE
 - Válvula de pie: HDPE



Ilustración 3: Muestra tubos disponibles inicialmente.



Ilustración 2: Cuerpo de la bomba y asidero.



Ilustración 4: Cuerpos de las válvulas.

Por ser un modelo relativamente reciente no hay desarrolladas evoluciones del diseño original. Por ello las opciones para la configuración de la misma son escasas (ver Tabla 8).

Bomba manual Malda

Lista de opciones disponibles:

Opciones	A	B
Cuerpo de la bomba	Cuerpo con accionador y pedestal. Plano A5002	Cuerpo con accionador & soporte ISO. Plano D9098
Tubería de ascensión	Tuberías de HDPE con abrazaderas para las uniones reforzadas	---
Pistón + Válvula de pie	Forro de fricción, pistón y válvula de pie de HDPE. Plano A5004	---
Varillas	Tuberías de HDPE reforzadas. Plano A5006	---

HDPE: Polietileno de alta densidad

ISO: Organización internacional de estándares

Tabla 8: Opciones de configuración de la MALDA.

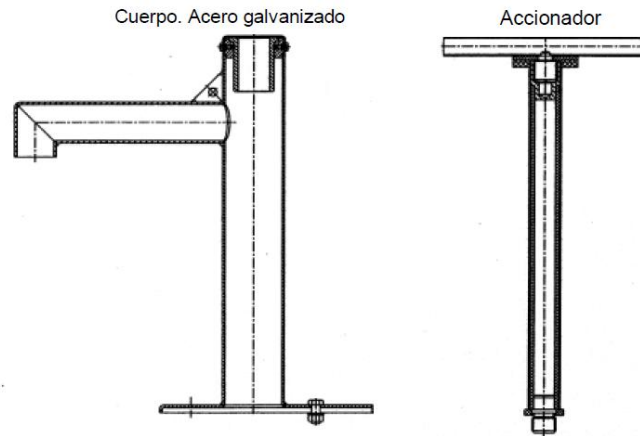


Figura 9: Detalle del cuerpo de la bomba y del accionador.

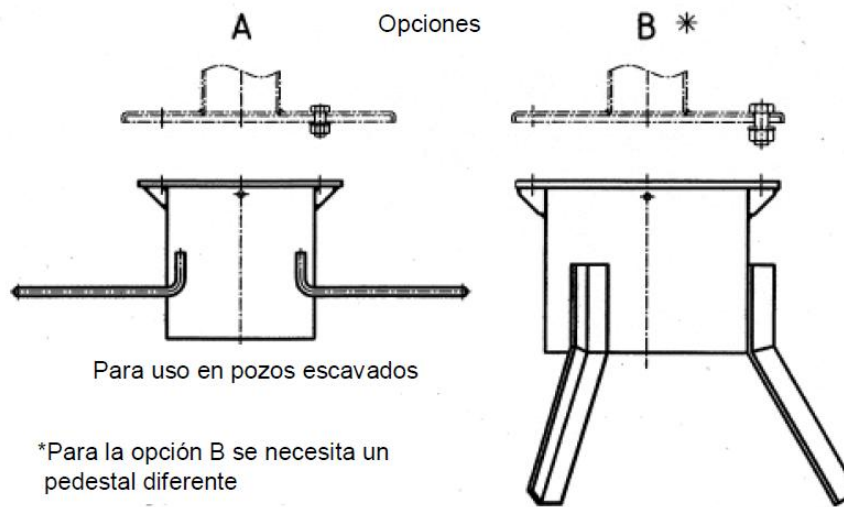


Figura 10: Opciones de configuración.

En nuestro caso la configuración AA es la que tenemos en el laboratorio, aunque realmente el tipo de pedestal nos daría igual ya que estos están diseñados para tener una superficie a la que atornillar el cuerpo de la bomba en terrenos arenosos. Nosotros tendremos la suerte de poder hacerlo directamente al suelo del laboratorio sin utilizar pedestal.



Ilustración 5: Detalle modo de anclaje.

También deberemos seleccionar los componentes subterráneos que tenemos que instalar según la profundidad a la que se encuentre el pozo según la siguiente tabla.

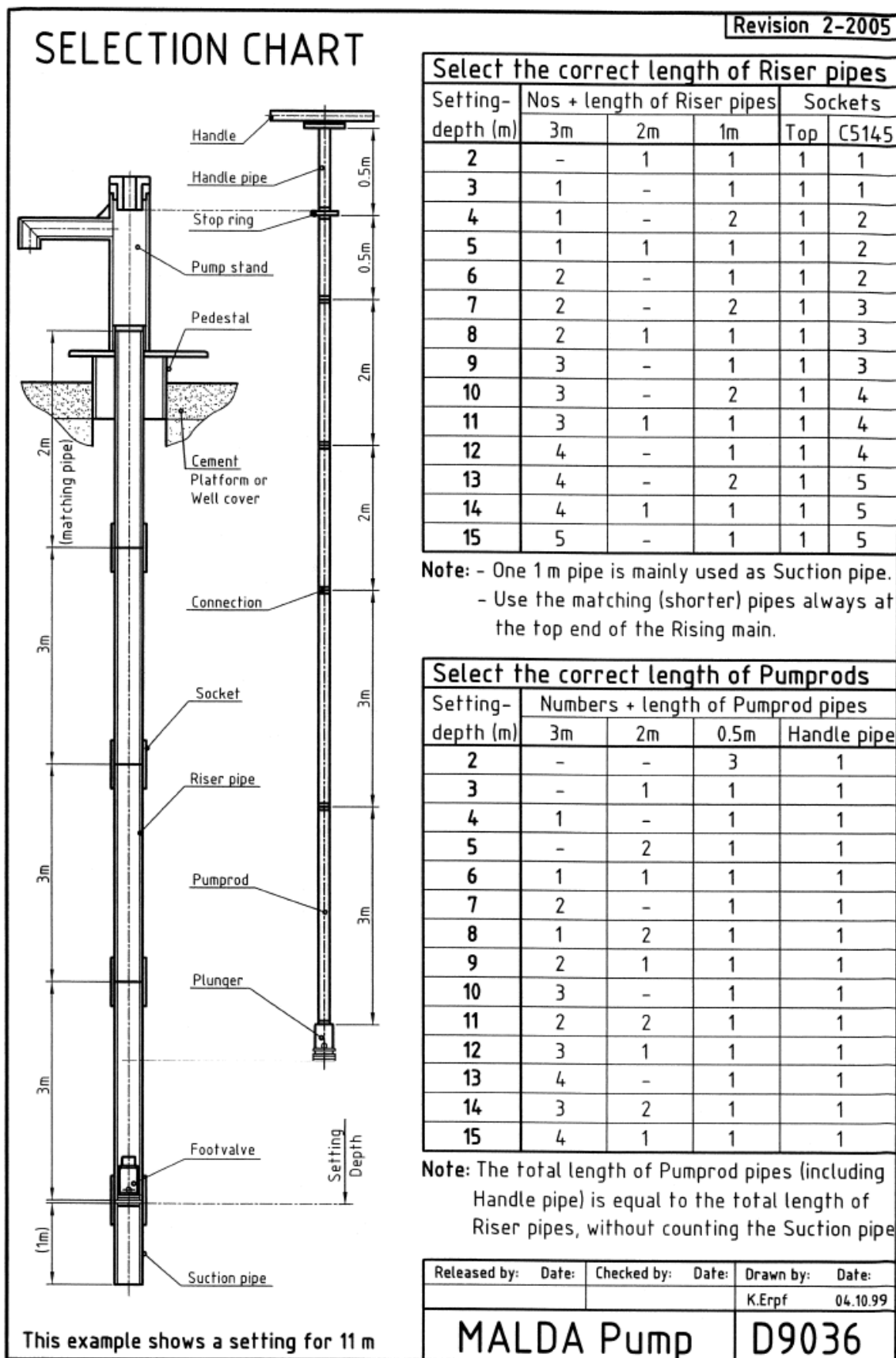


Figura 11: Tabla de selección de componentes subterráneos según profundidad de instalación (SKAT 2005).

4.3. *Material disponible inicialmente.*

Comencemos comentando el material que la universidad recibió cuando la bomba fue enviada y que, inicialmente, es el que disponemos para realizar un primer montaje. Cabe destacar que cuando comenzamos el proyecto los componentes de la bomba llevaban un tiempo indeterminado en el laboratorio pudiéndose haber perdido o deteriorado alguna de ellas tras haber sido usadas para otros proyectos. Tomaremos como referencia el desglose de componentes del Anexo 1.

Dividiremos las piezas disponibles en 2 grupos:

- Piezas necesarias en el montaje sea cual sea la profundidad del pozo/depósito del que queremos sacar agua.
- Piezas que pueden ser necesarias o no dependiendo de la profundidad del pozo/depósito del que queremos sacar agua.

Información preliminar relativa a la bomba

En primer lugar pondremos atención al primero de los dos grupos utilizando las siguientes tablas:

Nº Plano	Pieza	Material	Cantidad	Subconjunto formado	Nº Plano del subconjunto.
C5011	Amortiguador	Caucho de nitrilo	1	Accionador	A5006
C5010	Conector Superior	Acero	1		
C5009	Plato	Acero	1		
C5008	Asidero	Acero	1		
C5014	Anillo de seguridad	HDPE PE-80	1		
C5047	Cubierta superior	Acero	1		
C5013	Manga	Acero	1		
C5012	Guía	HDPE PE-80	1		
C5038	Primer tramo de la varilla	HDPE PE-80	1		
C5140	Conector macho	HDPE PE-80	1		
C5139	Conector hembra	HDPE PE-80	1		
C1010	Anillo-O	Caucho de nitrilo	1	Válvula de pie	A5053
C5050	Anillo de sujeción	HDPE PE-80	1		
C5140	Conector hembra	HDPE PE-80	1		
C2088	Bobina	Caucho de nitrilo	1		
C5048	Cuerpo	HDPE PE-80			
C1093	Tornillo hexagonal	Acero	2	Cuerpo soporte	B5016
C1016	Tuerca hexagonal	Acero	4		
C1100	Tornillo hexagonal	Acero	4		
C5051	Nervio	Acero	1		
C5052	Caño	Acero	1		
C5020	Acople superior	Acero	1		
C5136	Cuerpo de la bomba	Acero	1		
C5021	Plataforma	Acero	1		
C5138	Anillo partido		1	Válvula móvil	A5054
C2088	Bobina	Caucho de nitrilo	1		
C5048	Cuerpo	HDPE PE-80			
C2052	Nervio	Acero	2	Pedestal (No lo usamos en nuestra instalación)	B5022
C5024	Anclaje	Acero	2		
C5023	Tubería de sujeción	Acero	1		
C2053	Base	Acero	1		

Tabla 9: Piezas necesarias a cualquier profundidad de instalación.

Dejaremos a un lado el cuerpo de la bomba, sistemas de anclaje y demás componentes que debemos montar sea cual sea la altura a la que queremos hacerlo y nos centraremos en las tuberías y conectores que tenemos en éste momento, de los cuales depende la altura a la que tenemos que instalar el cuerpo de la bomba.

Información preliminar relativa a la bomba

Nº Plano	Pieza	Material	Longitud (mm)	Diámetro ext. (mm)	Espesor (mm)	Cantidad
C5042	Tubería de ascensión	HDPE PE-80	1000	63	5,8	2
C5043	Tubería de ascensión		2000	63	5,8	2
C5140	Conector macho		-	40	-	4
C5139	Conector hembra		-	40	-	4
C5038	Varilla		500	40	5,5	2
C5039	Varilla		2000	40	5,5	2
C5145	Encaje		200	75	6(sin rosca)	3
C5045	Encaje superior		66	75	6(sin rosca)	1

Tabla 10: Piezas subterráneas disponibles inicialmente.

Como aclaración a la anterior Tabla 10 debemos decir dos cosas:

- Las longitudes reales de las piezas de la varilla no son las indicadas en la, pero son las longitudes que debemos tener en cuenta para el montaje (conectores acoplados).
- Los números de plano corresponden a los mostrados en el Anexo 1 y así será de aquí en adelante.
- El componente de la varilla de 500mm del accionador tiene una terminación especial en uno de sus extremos realizada para poder acoplar un anillo necesario para el correcto funcionamiento de la bomba (Anillo de seguridad). Deberemos poner éste tubo acoplado asidero sea cual sea la profundidad de montaje, no se debería suprimir.

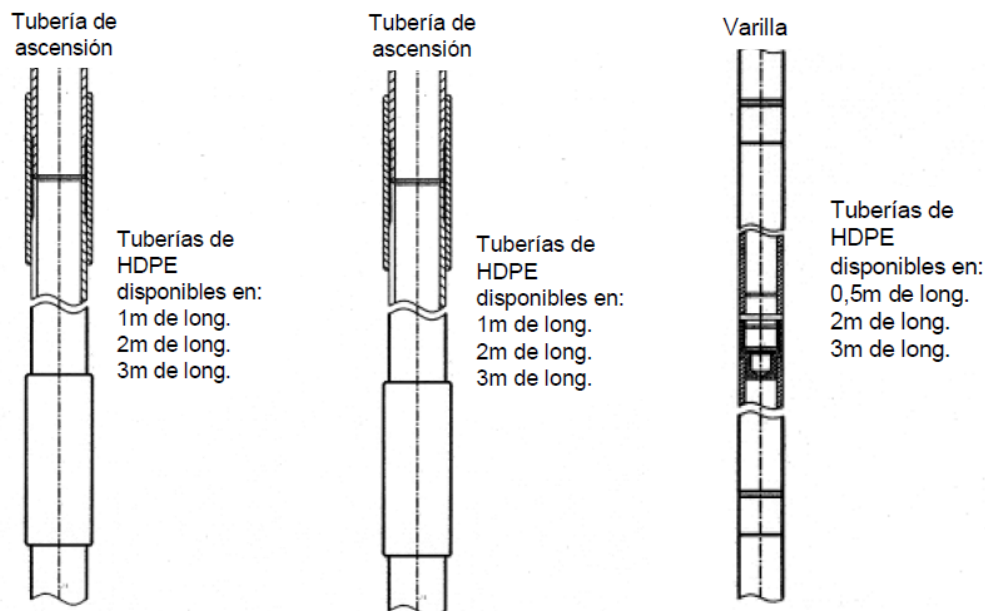


Figura 12: Elementos subterráneos.

5. Características de las instalaciones.

5.1. Características de instalación óptima (SKAT “Malda Handpump Specification. Revision 2-2005”).

El primer paso es la comprobación y ensamblaje de todas las piezas según el siguiente algoritmo:

- Comprobación de la existencia de todas las piezas necesarias para el montaje a realizar.
- Examen visual de todas las piezas.
- Chequeo de las dimensiones de cada pieza.
- Verificación de la existencia de un chaflán de 30°, un tamaño correcto y un redondeo en los bordes de todas las piezas de la tubería de ascensión para facilitar el guiado de la varilla.
- Chequeo exhaustivo de cada cilindro, comprobando que no pierden agua (tubería de ascensión) o que no se llenan (varilla).
- Montaje y ajuste de todas las uniones roscadas de forma manual, excepto los tornillos y tuercas (que tendrán que ser apretados con la llave recibida con la bomba).
- La Manga, debe girar libremente y no estar atascada entre el Asidero y el Anillo de seguridad.

Para un montaje óptimo según organismos oficiales debemos cumplir los siguientes requisitos:

- La válvula de pie debe estar como mínimo a una profundidad de un metro respecto a la superficie libre del agua en época de sequía.
- La varilla debe medir lo mismo que la tubería de ascensión.
- La tubería de succión debe medir 1 m.
- El orificio inferior de la tubería de succión debe estar a, por lo menos, de 20 a 30 cm del fondo del depósito/pozo.

Características de las instalaciones

Con las tuberías de las que disponemos inicialmente, técnicamente podemos realizar el montaje a las siguientes profundidades:

Montaje	Profundidad de la válvula inferior (m)	Profundidad total de los tubos necesarios teniendo en cuenta la tubería de succión (m)
1	1	2
2	3	4
3	5	6

Tabla 11: Montajes posibles con el material inicial.

Obviamente las dos primeras opciones no son útiles si queremos estudiar el comportamiento de la bomba en condiciones de funcionamiento real ya que está diseñada para extraer agua de profundidades entre 5 y 12m (Anexo 1, SKAT “Malda Handpump Specification. Revision 2-2005”).

Una vez montada la bomba deberemos realizar un test de descarga consistente en llenar un recipiente con, al menos, 20l con 40 golpes en un minuto además de un test de pérdidas especificado en el Anexo 2. Este segundo test lo haremos sin seguir las directrices del documento oficial, de una manera más complicada, pero que ofrecerá resultados mucho más precisos y útiles.

5.2. Características de las instalaciones posibles en el laboratorio según la profundidad del depósito.

El laboratorio disponible para realizar la instalación dispone de dos alturas posibles para el montaje de la bomba, el primer piso se encuentra a, exactamente, 383cm por encima de la superficie donde descansa el depósito de agua y el segundo piso esta a 400cm por encima del primer piso. En principio podríamos realizar instalaciones de 353 y 753cm de profundidad (hasta el borde inferior de la tubería de succión).

El primer problema al que nos enfrentamos es que la tubería de succión mide 1m y nuestro depósito tiene una altura hasta la superficie libre del agua de unos 170cm (180cm factibles si lo llenáramos hasta el borde) ; contando con los 30cm de profundidad necesarios por debajo de la tubería de succión, el medio metro entre las dos válvulas en el punto muerto inferior y la necesidad de que la válvula superior esté como mínimo a una profundidad igual que la de la superficie libre del agua en el punto muerto superior, observamos que no podemos hacer un montaje óptimo de la bomba con las tuberías que tenemos inicialmente en un depósito tan poco profundo ya que la válvula inferior se quedaría sumergida solo de 35 a 45cm (necesitamos 1m) y la válvula superior no estaría sumergida ni siquiera en el punto muerto inferior con lo que tenemos que idear la manera de ganar esos 65cm que nos faltan.

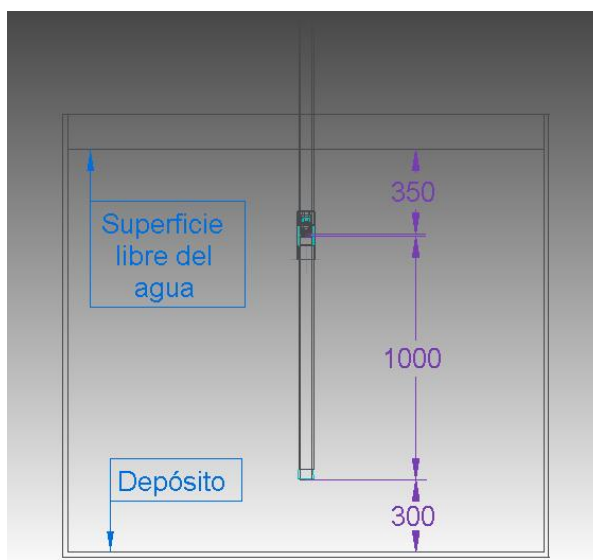


Figura 13: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión y distancia hasta el fondo del pozo óptimas (mm).

Como respuesta a éste primer y muy importante contratiempo, consideramos que los 30cm libres necesarios bajo la tubería de succión sirven más para que la bomba no absorba sedimentos de el fondo del pozo del que se sacara el agua que para que el flujo absorbido no sufra perturbaciones; y como en nuestro caso no hay sedimentos en el fondo del depósito, decidimos que **15cm libres bajo la tubería de succión es una distancia suficiente para mantener el flujo absorbido sin muchas perturbaciones.**

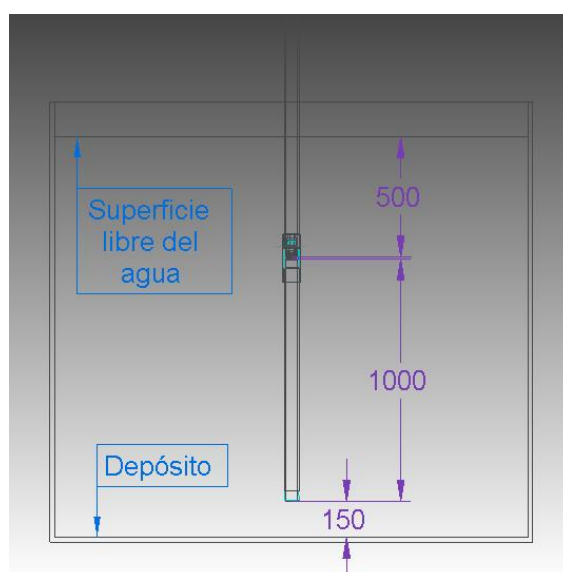


Figura 14: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión óptima y distancia hasta el fondo del pozo reducida (mm).

Modificando la distancia libre bajo la tubería de succión ganamos 15cm de profundidad de instalación pero aún no es suficiente para mantener la válvula inferior un metro bajo el agua. La única alternativa que nos queda es acortar el tubo de succión; el flujo será más estable cuanto más largo sea este tubo (sin abusar, ya que también produce rozamiento) pero consideramos que **0,5 m es una longitud razonable para la tubería de succión**, además hemos podido consultar algunos documentos no oficiales que abalan esta teoría.

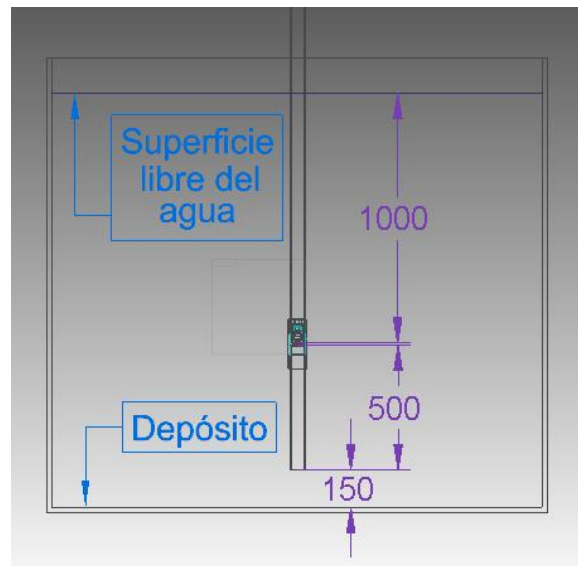


Figura 15: Detalle instalación con longitud de la tubería de succión y distancia hasta el fondo del pozo reducidas (mm).

Bien, con las anteriores alternativas solucionamos el problema de la profundidad de nuestro depósito pero ahí no acaban los contratiempos. Los materiales de los que están fabricados los diferentes componentes de la bomba y sus medidas (longitud, espesor, roscas, piezas de unión...) son caros y algunos muy difíciles de encontrar en nuestro país aunque no debería ser así, por lo que debemos estar totalmente seguros de que no hay otra posibilidad antes de cortar alguno de ellos, además, todos los componentes de la tubería de ascensión tienen los extremos roscados para poder ser unidos entre sí así que si queremos cortar un tubo debemos estar seguros de que podremos roscar los nuevos extremos; más adelante explicaremos detenidamente los problemas a los que nos enfrentamos para conseguir los tubos necesarios para nuestros experimentos.

Dentro de éste apartado también debemos decir que para poder fijar el cuerpo de la bomba al piso debemos emplear un taco de madera de 2cm de espesor, distancia que tendremos en cuenta a partir de ahora para calcular profundidades de montaje de una manera lo más exacta posible, También consideraremos que el extremo superior de la tubería de succión sube 4cm por encima del nivel del suelo cuando está montada por la pieza que hace tope en la parte superior de la tubería de ascensión para que esta no se caiga al fondo del pozo (Encaje Superior).



Ilustración 6: Taco de madera.

Características de las instalaciones

Con todo lo anterior:

$$\begin{aligned} & 383_{\text{altura del primer piso}} - 15_{\text{distancia libre}} + 4_{\text{distancia consumida por el tope}} \\ & + 2_{\text{distancia consumida por la plataforma de madera}} - 50_{\text{longitud de la tubería de succión}} \\ & = 324_{\text{longitud de la tubería de ascensión con el cuerpo de la bomba anclado en el primer piso del laboratorio(cm)}} \end{aligned}$$

Sumando 400cm a los 324cm calculados obtenemos la longitud de la tubería de ascensión para los montajes en el segundo piso.

Después de amoldar las especificaciones del montaje a nuestra instalación, podríamos hacer montajes a 324 y 724cm (longitud de la tubería de ascensión sin contar la de succión y por consiguiente, también de la varilla).

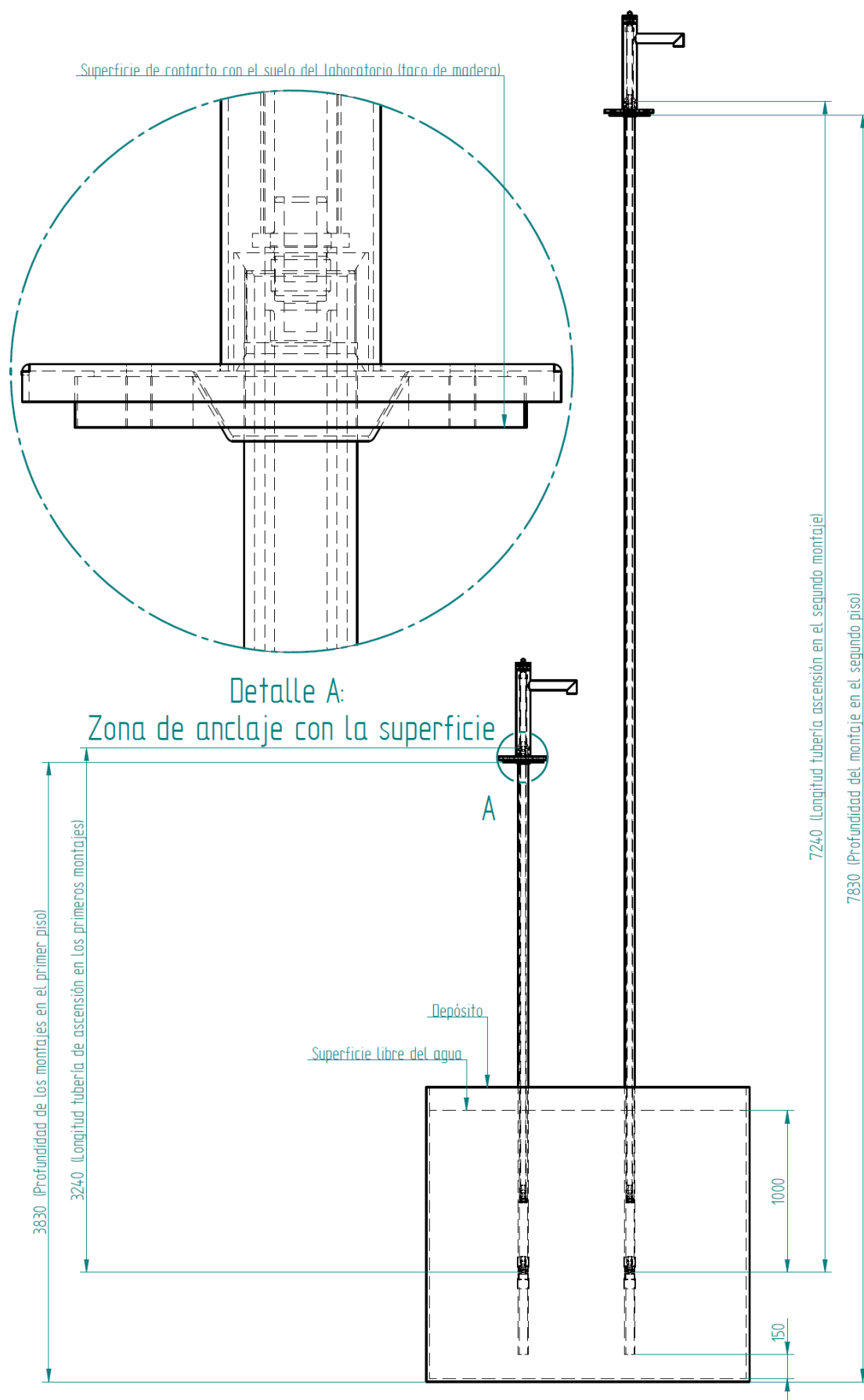


Figura 16: Croquis de las instalaciones posibles en el laboratorio con detalle de la zona de anclaje (mm).

Finalmente deberemos adaptar la longitud de la varilla para que la distancia entre válvulas sea lo más parecida posible a las especificadas en el Apartado 5.1., sabiendo que no podemos cortar los tubos de los que está formada ya que llevan los conectores roscados pegados a sus extremos para ser unidos y, a priori, no disponemos más que de los que están puestos ya que no se pueden despegar y volver a pegar en tubos de otras longitudes.

5.3. Características de las instalaciones realizadas.

En este apartado nos disponemos a explicar el motivo por el cual elegimos las piezas que montamos finalmente y los motivos que nos llevaron a ello.

5.3.1. Primer montaje. Cuerpo de la bomba anclado en el primer piso del laboratorio.

Teniendo en cuenta las modificaciones que estaríamos dispuestos a realizar respecto al montaje óptimo especificado en los manuales oficiales descritos en el Apartado 5.1., comenzamos por adaptar los elementos disponibles inicialmente para poder realizar un primer montaje en el que el caño de la bomba está anclado en el primer piso del laboratorio, teniendo en cuenta esta ubicación, debemos lograr una longitud total de 374cm para la tubería de ascensión incluyendo la de succión y de 324cm para la varilla. Sabemos que la profundidad/altura de esta primera instalación no entra dentro del rango de las óptimas para el funcionamiento de la bomba pero en un primer momento no disponemos de tubos suficientes para anclar la bomba en el segundo piso y debemos hacerlo para comprobar que todos los elementos están en perfecto estado y finalmente podemos sacar agua de nuestro depósito. También nos servirá para recoger datos y comprobar empíricamente que el rango de profundidad de montaje óptimo está establecido con una base fundada.

Para la profundidad especificada necesitamos 2 piezas de HDPE de 63mm de diámetro (Tubería de ascensión/succión), una de 100cm y otra de 200cm de longitud (las tenemos), también necesitamos una tubería de succión de 50cm de longitud (la que tenemos es de 100cm) y una pieza extra del mismo diámetro y espesor pero con una longitud tal que la suma de todas sean los 374cm antes mencionados, 24cm para ser exactos. También debemos tener en cuenta que los tubos de 63mm de diámetros recibidos van roscados por ambos extremos y que si cortamos alguna de estas piezas, obtendremos dos nuevas piezas con rosca en solo uno de sus extremos así que debemos pensar detenidamente qué pieza podemos cortar y cómo hacerlo.

Concluimos que las únicas piezas que pueden no ir roscadas en uno de los extremos son: la tubería de succión, ya que no lleva nada acoplado en su parte inferior, y la pieza situada en el extremo superior de la tubería de ascensión, que también debería ir roscada para ser unida a la pieza que la sujeta al cuerpo de la bomba (Encaje superior), pero que puede ser sustituida por una abrazadera de la medida apropiada.

Haciendo un breve inciso en este momento diremos que, como luego explicaremos, nuestra intención fue desde el principio tratar de cuidar al máximo los materiales recibidos con la bomba para su instalación, ya que no tardamos en darnos cuenta de que, ya fuera por motivos técnicos o económicos, nos iba a resultar muy difícil encontrar recambios y nuevas piezas.

Características de las instalaciones

Con la información anterior concluimos que para éste primer montaje tenemos un tubo de HDPE de 63mm de diámetro y un metro de longitud roscado por los dos lados de más, comprobamos que resulta perfecto para cortar ya que es de los más pequeños que tenemos y además hay dos, por si luego nos hiciera falta un tubo de esa medida para alguna comprobación. Por todo esto procedemos a cortarlo obteniendo 3 piezas de las cuales nos valen 2, una de 50 y otra de 24cm roscadas ambas por uno de sus extremos y con esto tenemos nuestra nueva tubería de succión más corta y la pieza que nos faltaba para la instalación en el primer piso de la tubería de ascensión.



Ilustración 7: Piezas resultantes después del corte del tubo de HDPE (1m) necesarias para el montaje.

Subconjunto	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad
Tubería de ascensión	HDPE	1000	5,8	63	1
		2000	5,8	63	1
		240	5,8	63	1
Tubería de succión		500	5,8	63	1

Tabla 12: Tabla resumen de piezas necesarias de las tuberías de ascensión y succión para las instalaciones en el primer piso.

En cuanto a la varilla, debemos acoplar los tubos de HDPE de 40mm de diámetro para obtener un tubo hueco que se aproxime lo más posible a una longitud de 324cm para ello disponemos de varias opciones que expondremos a continuación.

5.3.1.1. Longitud de la Varilla, Opción 1:

Lo primero que hacemos es acoplar 3 tubos de 50cm a otro de 200cm, con una longitud total de 350cm, con los materiales disponibles inicialmente es la opción más sensata ya que es la única configuración factible con la que la válvula móvil en el PMS queda por debajo de la superficie libre del agua. A continuación les ofrecemos una tabla resumen.

Distancia entre válvulas en el PMI = 240 mm → 260 mm menor que la óptima.					
Subconjunto	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad
Tubería de ascensión	HDPE PE-80	1000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		2000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		240	5,8	63	1
Tubería de succión		500	5,8	63	1
Varilla		500	5,5	40	3
Varilla		2000	5,5	40	1

Tabla 13: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 1.

5.3.1.2. Longitud de la Varilla, Opción 2:

La otra opción sería acoplar 2 tubos de 50cm al otro de 200cm y aunque la opción más lógica sea la número 1, debemos darnos cuenta que la diferencia absoluta entre la longitud óptima y las longitudes de las opciones 1 y 2 son casi la misma, por éste motivo, también procederemos a su estudio.

Distancia entre válvulas en el PMI = 740 mm → 240 mm mayor que la óptima.					
Subconjunto	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad
Tubería de ascensión	HDPE PE-80	1000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		2000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		240	5,8	63	1
Tubería de succión		500	5,8	63	1
Varilla		500	5,5	40	2
Varilla		2000	5,5	40	1

Tabla 14: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 2.

5.3.1.3. Longitud de la Varilla, Opción 3:

Como alternativa también contemplamos la posibilidad de acoplar una pieza adicional (finalmente construida de PVC) de 240mm a la configuración de la opción 2, obteniendo una configuración óptima en cuanto a distancia entre válvulas se refiere, por lo que también estudiaremos el comportamiento de la bomba en estas condiciones.

Distancia entre válvulas en el PMI = 500 mm → Óptima.					
Subconjunto	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad
Tubería de ascensión	HDPE PE-80	1000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		2000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		240	5,8	63	1
Tubería de succión		500	5,8	63	1
Varilla		500	5,5	40	2
Varilla		2000	5,5	40	1
Varilla	PVC	240	3,0	40	1

Tabla 15: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 3.

5.3.1.4. Longitud de la Varilla, Opción 4:

Por último también deberemos introducir en este apartado la alternativa de construir nuestra varilla completamente en PVC aprovechando el material necesario para realizar nuestro segundo montaje y así también caracterizar la bomba de nuevo fijando el parámetro de longitud de la varilla y variando los de su densidad, espesor y como resultado de ambas, su masa.

Distancia entre válvulas en el PMI = 500 mm → Óptima.					
Subconjunto	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad
Tubería de ascensión	HDPE PE-80	1000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		2000	5,8	63	1
Tubería de ascensión		240	5,8	63	1
Tubería de succión		500	5,8	63	1
Varilla		500	5,5	40	1
Varilla	PVC	2740	3,0	40	1

Tabla 16: Tubos necesarios para el primer montaje, opción 4.

Para un mejor entendimiento de las opciones mencionadas ofreceremos a continuación la siguiente figura:

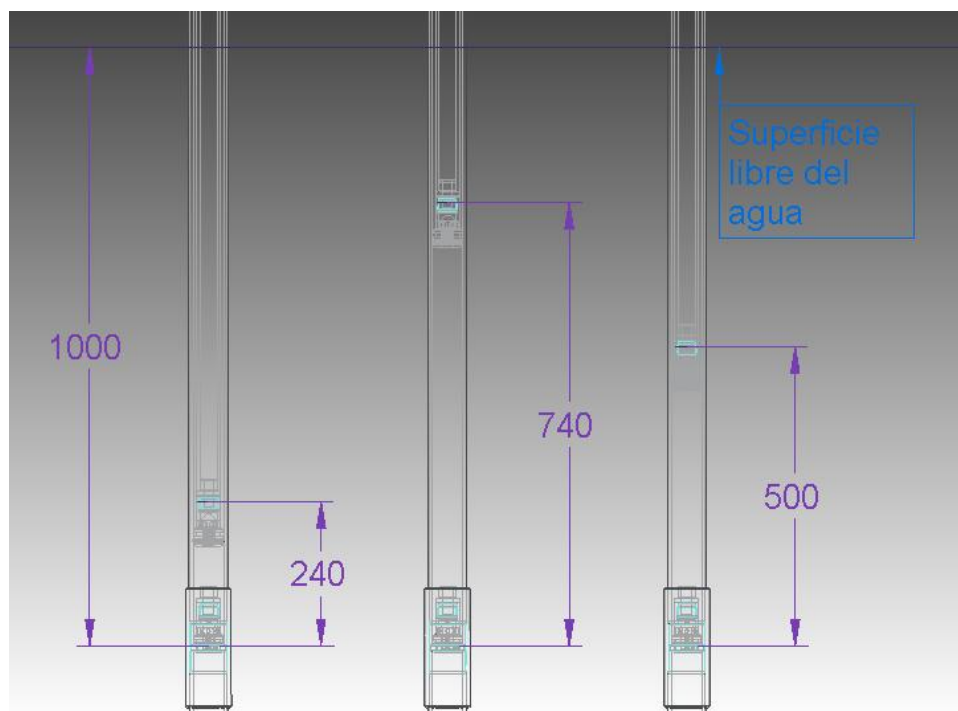


Figura 17: Detalle de las distancias entre válvulas en el PMI de los montajes en el primer piso del laboratorio. De izquierda a derecha, opción 1, opción 2 y opciones 3 y 4 (igual distancia)(mm).

En los apartados sucesivos expondremos los resultados de los experimentos y sus conclusiones que nos harán entender mejor las ventajas e inconvenientes de las cuatro alternativas.

5.3.2. Segundo montaje. Cuerpo de la bomba anclado en el segundo piso del laboratorio.

Para este segundo montaje partiremos de la base de que las medidas calculadas para el primer montaje nos son perfectamente válidas y nuestro único problema para esta etapa es lograr ampliar 400cm más la longitud de las tuberías que ya tenemos para así lograr anclar el cuerpo de la bomba en el segundo piso del laboratorio manteniendo la profundidad de las válvulas antes calculadas, valoradas y aceptadas dentro del depósito.

Una vez entendida nuestro objetivo en éste punto procedemos a valorar cronológicamente las diferentes opciones que barajamos para llevarla a cabo:

5.3.2.1. Opción 1: Tubos y conectores de HDPE PE-80.

La primera opción y, a priori, la más fácil era conseguir tubos de las mismas medidas y materiales, y con las mismas roscas de los que disponemos, así como mecanizar conectores iguales a los que tenemos para construir piezas similares a las que venían con la bomba de fábrica y así solo tener que enroscar las piezas nuevas a las que ya tenemos hasta alcanzar la altura deseada.

En un primer momento, todas las personas involucradas de alguna manera en este proyecto pensamos que esta primera opción sería la más fácil ya que, como ya hemos dicho en apartados anteriores, este tipo de bombas están desarrolladas a partir del concepto VLOM entre cuyos principios se encuentra el de que las tecnologías escogidas deben estar fabricadas con materiales fáciles de conseguir en los países donde se va a instalar y teniendo en cuenta que vivimos en un país considerado como “desarrollado” supusimos que encontrar los materiales necesarios para fabricar nuevos fragmentos de tubo sería el menor de nuestros problemas. Pero nada más lejos de la realidad.

El primer problema con el que nos encontramos fue que el polietileno del que estaban fabricadas las tuberías originales era de densidad PE 80, la cual nos enteramos que estaba obsoleta en nuestro país ya que hacía tiempo que se había normalizado el uso del polietileno de densidad PE 100, ya que con éste tipo se podía reducir el espesor de la pared del tubo y éste seguiría aguantando la misma presión del fluido que transportara. A causa de esto, invertimos varios días en encontrar alguna empresa que nos suministrara material similar al que teníamos en nuestro poder. Finalmente comprendimos que muy pocas empresas en España nos podrían suministrar tubos de HDPE-PE 80-PN 12,5 de 63 mm de diámetro (Tubería de ascensión) y que no había ninguna que pudiera suministrarnos tubos de HDPE-PE 80-PN 20 de 40mm (Varilla) ya que nosotros queríamos una muy pequeña cantidad y ningún fabricante de tubos tiene esa medida en stock ya que no se utiliza. Todo ello además de que el presupuesto que nos daban las empresas de mecanizado para hacer los conectores no era asumible por el departamento. Los Técnicos del departamento de Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid junto con otros profesionales cualificados externos a la universidad no sabían con exactitud las medidas de la rosca no pudiendo fabricarla y no pudiendo contemplar la posibilidad de unir nuestros tubos con otro tipo de conectores ya que no encontramos ningún modelo en el mercado que tuviera un diámetro máximo igual al del diámetro exterior de la tubería que se quería unir, condición indispensable para que la varilla se moviera libremente dentro de la tubería de ascensión y la bomba funcionara correctamente

Unido a todo lo anterior, **todos los profesionales con los que hablamos, nos dijeron que el HDPE no se podía pegar con pegamento**. Sorprendentemente, todo el mundo mantuvo esa versión aun cuando veían las piezas que recibimos con la bomba, en las cuales, efectivamente, los conectores estaban pegados a los tubos. Incluso páginas web especializadas respaldaban la negativa.

Una vez entendimos que nos iba a ser imposible fabricar de HDPE nuevas piezas de la varilla, nos centramos en los tubos de la tubería de ascensión ya que van roscados y no pegados. De este modo nos dimos cuenta de que los conectores (Encajes, plano C5145), necesarios para unir los fragmentos de tubo de 63mm de diámetro solo podíamos fabricarlos con trozos de tubo de HDPE-PE 80- PN 20 de 75mm de diámetro, medida que también era imposible de conseguir. Pensamos en otras maneras de unir los tubos pero como ya hemos explicado, el polietileno no se pudo pegar asique tuvimos que desear por ejemplo, la opción de unir los fragmentos de tubería con uniones pegadas de 3 piezas, lo que hubiera permitido un fácil montaje y uno escaso desembolso en gastos de envío ya que podrían traer lo tubos cortados. Asique finalmente tendríamos que pedir un tubo sin cortar de una medida tal que nos permitiera realizar con garantías este segundo montaje, a la vez que pudiera ser transportada sin un gasto desorbitado por el transporte.

Antes de hacer el pedido, procedimos a pedir presupuesto para roscar los tubos de varias empresas de mecanizado de plásticos. Así nos dimos cuenta de que la técnica para roscar la tubería que nos ofrecían tanto los Técnicos de la Universidad como varias de las empresas a las que acudimos a obtener información era mecanizar en un torno una pieza de pequeño tamaño y pegarla aún extremo del tubo por termo fusión, algo que indudablemente hacía que el departamento no pudiera asumir el gasto de la fabricación de las piezas.

En resumen, los problemas a los que nos enfrentábamos con ésta primera opción eran:

- Imposibilidad de conseguir una tubería de 40mm de diámetro similar a las que disponíamos y los conectores necesarios para su unión.
- Imposibilidad de conseguir pegamento apropiado para pegar HDPE.
- Presupuesto elevado para los mecanizados necesarios para los dos tipos de tuberías.

Así pues, en un primer momento, de este modo no pudimos hacer ninguno de los dos subensamblajes que necesitábamos.

Con todo nos dimos cuenta que los conectores nos iban a ser necesarios fuera cual fuese el material del que los quisiéramos fabricar, asique decidimos invertir varios días en investigar la naturaleza de la rosca para que posteriormente pudiéramos fabricarlas en la universidad. Fue imposible conseguir estas piezas desde un primer momento puesto que, aun teniendo los planos, numerosos profesionales del sector sostuvieron que las medidas de las roscas no estaban normalizadas.

Finalmente dimos con un experto de una de las empresas de mecanizado de plásticos a la que fuimos a recopilar información y presupuesto que nos confirmó que realmente las roscas estaban normalizadas solo que habían sido fabricadas con un molde y al enfriarse, el polietileno había sufrido deformaciones por lo que con los instrumentos que habíamos estado utilizando para averiguar la medida de las roscas se detectaban pequeñas imperfecciones que nos impedían apreciar con claridad qué tipo de rosca era exactamente.

Seguidamente pedimos a los técnicos que nos hicieran un modelo en PVC con la rosca que ahora creíamos que tenían nuestros conectores, comprobando así que la rosca estaba normalizada y que encajaban con las piezas recibidas con la bomba, habíamos solucionado así un gran problema de todos los que se nos habían presentado.

Llegados a este punto, **para esta primera opción del segundo montaje, nos faltaban los tubos de las medidas necesarias pero logramos averiguar de la medida de las roscas de los conectores de la varilla.**

5.3.2.2. Opción 2: Tubos y conectores de otros materiales.

Ante las dificultades que nos encontramos para llevar a cabo la opción número 1 decidimos buscar tubos de materiales más fáciles de encontrar y que pudieran ser pegados con garantías para así poder utilizar uniones de 3 piezas para los tubos más anchos y poder pegar los conectores fabricados artesanalmente a nuestra nueva varilla.

5.3.2.2.1. Tubos y conectores de otros materiales respetando las medidas originales.

Comenzamos contemplando la posibilidad de fabricar las piezas que nos faltaban con PVC con los mismos espesores y diámetros, atendiendo a la Tabla 17:

Diámetro (mm)		Ovalación (mm)		Longitud		Espesor (mm)						
DN	Toler. OD	SDR 41	SDR 26	Valor nominal	Tolerancia	S20	S 16	S 12,5	S 10	S8	S 6,3	S5
		a	a			SDR	SDR	SDR	SDR	SDR	SDR	SDR
		SDR 33	SDR 11			41	33	26	21	17	13,6	11
							PN7,5	PN 8	PN 10	PN12,5	PN 16	PN 20
12	0,2		0,5	6	+/- 10							1,5
16	0,2		0,5	6	+/- 10							1,5
20	0,2		0,5	6	+/- 10						1,5	1,9
25	0,2		0,5	6	+/- 10					1,5	1,9	2,3
32	0,2		0,5	6	+/- 10			1,5	1,6	1,9	2,4	2,9
40	0,2	1,4	0,5	6	+/- 10		1,5	1,6	1,9	2,4	3,0	3,7
50	0,2	1,4	0,6	6	+/- 10		1,6	2,0	2,4	3,0	3,7	4,6
63	0,3	1,5	0,8	6	+/- 10		2,0	2,5	3,0	3,8	4,7	5,8
75	0,3	1,6	0,9	6	+/- 10		2,3	2,9	3,6	4,5	5,6	6,8
90	0,3	1,8	1,1	6	+/- 10		2,8	3,5	4,3	5,4	6,7	8,2
						PN 6	PN 8	PN 10	PN 12,5	PN 16	PN 20	PN 25
110	0,4	2,2	1,4	6	+/- 10	2,7	3,4	4,2	5,3	6,6	8,1	10,0
125	0,4	2,5	1,5	6	+/- 10	3,1	3,9	4,8	6,0	7,4	9,2	11,4
140	0,5	2,8	1,7	6	+/- 10	3,5	4,3	5,4	6,7	8,3	10,3	12,7
160	0,5	3,2	2,0	6	+/- 10	4,0	4,9	6,2	7,7	9,5	11,8	14,6
180	0,6	3,6	2,2	6	+/- 10	4,4	5,5	6,9	8,6	10,7	13,3	16,4
200	0,6	4,0	2,4	6	+/- 10	4,9	6,2	7,7	9,6	11,9	14,7	18,2
225	0,7	4,5	2,7	6	+/- 10	5,5	6,9	8,6	10,8	13,4	16,6	
250	0,8	5,0	3,0	6	+/- 10	6,2	7,7	9,6	11,9	14,8	18,4	
280	0,9	6,8	3,4	6	+/- 10	6,9	8,6	10,7	13,4	16,6	20,6	
315	1,0	7,6	3,8	6	+/- 10	7,7	9,7	12,1	15,0	18,7	23,2	
355	1,1	8,6	4,3	6	+/- 10	8,7	10,9	13,6	16,9	21,1	26,1	
400	1,2	9,6	4,8	6	+/- 10	9,8	12,3	15,3	19,1	23,7	29,4	
450	1,4	10,5	5,4	6	+/- 10	11,0	13,8	17,2	21,5	26,7	33,1	
500	1,5	12,0	6,0	6	+/- 10	12,3	15,3	19,1	23,9	29,7	36,8	
560	1,7	13,5	6,8	6	+/- 10	13,7	17,2	21,4	26,7			
630	1,9	15,2	7,6	6	+/- 10	15,4	19,3	24,1	30,0			
710	2,0	17,1	8,6	6	+/- 10	17,4	21,8	27,2				
800	2,0	19,2	9,6	6	+/- 10	19,6	24,5	30,6				
900	2,0	21,6		6	+/- 10	22,0	27,6					
1.000	2,0	24,0		6	+/- 10	24,5	30,6					

Tabla 17: Dimensiones normalizadas de los tubos PVC-U para abastecimiento de agua potable (UNE-EN 1452-2), AseTUB (2007).

Observamos en la Tabla 17 que en la edición del 2007 del Manual Técnico de tuberías de PVC de la Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos (AseTUB) no están normalizadas medidas de tubos de PVC con un espesor superior a 3,7mm para diámetros nominales inferiores a 110mm. Con esta información descartamos la posibilidad de fabricar la varilla con PVC respetando las medidas originales. Por el contrario tenemos la certeza de que si existe la posibilidad de hacerlo con la tubería de ascensión.

Características de las instalaciones

También nos interesamos por las medidas tubos de otros materiales como el Polipropileno:

Material: PP-R 80
Presión nominal: PN 10-SDR 11
Serie de tubería: 5
Según: UNE-EN ISO 15874-1
Longitud: Tubos de 4 metros
Color: Verde

ref.	medidas(mm.)	ØD1	ØD2	E	capacidad agua l/m	peso kg/m	DN
84012	32 x 2,9	32	26,2	2,9	0,531	0,267	25
84013	40 x 3,7	40	32,6	3,7	0,834	0,412	32
84014	50 x 4,6	50	40,8	4,6	1,307	0,638	40
84015	63 x 5,8	63	51,4	5,8	2,075	1,010	50
84016	75 x 6,9	75	61,2	6,8	2,941	1,420	-
84017	90 x 8,2	90	73,6	8,2	4,254	2,030	65
84018	110 x 10,0	110	90,0	10,0	6,362	3,010	80
84019	125 x 11,4	125	102,2	11,4	8,199	3,900	100

Tubería PP-R 80, PN 10.

84049	160 x 21,9	160	116,2	21,9	10,600	9,120	125
-------	------------	-----	-------	------	--------	-------	-----

Tubería PP-R 80, PN 16.

ref.	medidas(mm.)	ØD1	ØD2	E	capacidad agua l/m	peso kg/m	DN
84039	20 x 2,8	20	14,4	2,8	0,163	0,156	15
84040	25 x 3,5	25	18	3,5	0,254	0,237	20
84041	32 x 4,4	32	23,2	4,4	0,415	0,38	25
84042	40 x 5,5	40	29	5,5	0,615	0,607	32
84043	50 x 6,9	50	36,2	6,9	1,029	0,901	40
84044	63 x 8,6	63	45,8	8,6	1,633	1,44	50
84045	75 x 10,3	75	54,4	10,3	2,307	2,09	-
84046	90x x 12,3	90	65,4	12,3	3,318	2,983	65
84047	110 x 15,1	110	79,8	15,1	5,674	4,387	80
84048	125 x 17,1	125	90,8	17,1	6,472	5,58	100

Tubería PP-R / fibra, SDR 7,4.

Tabla 18: Dimensiones tubos PPR normalizadas y comercializados por la empresa Jimten.

Como pueden observar, existen tubos de Polipropileno con las mismas medidas de espesor y diámetro exterior que los tubos de HDPE originales pero al empezar a buscar proveedores, volvimos a encontrarnos con que los tubos que necesitamos tienen demasiado espesor de pared y por ello escasas aplicaciones en la industria actual. Ninguna empresa de las innumerables con las que nos pusimos en contacto tenía tubos con un espesor tan grande en stock y no necesitábamos tanta cantidad como para mandar fabricarlos.

Entendimos en este punto que el verdadero problema era el enorme espesor de los tubos que buscábamos y no el material con el que estaban fabricados.

Sin embargo hubo varias empresas que nos aseguraron que podían conseguir por lo menos los de 63mm de diámetro para la tubería de ascensión en ese momento procedimos realizar el pedido a la empresa que nos ofreció la oferta más ajustada, aunque sorprendentemente, después de esperar el tiempo estipulado para el transporte de los tubos y de haber hablado con ellos en numerosas ocasiones, nos comunicaron que les era imposible suministrarnos los tubos. No los tenían en stock y no los iban a fabricar para nosotros.

Habiendo aprendido de la situación anterior, nos pusimos en contacto con otra de las empresas que decía poder suministrarnos las tuberías, esta vez intentando cerciorarnos de que tenían los tubos en el almacén. Ellos nos aseguraron al 100% que los tenían y que no había ningún problema en suministrárnoslos aunque después de muchas conversaciones interesándonos por el material y varias semanas de espera nos hicieron saber que debía haber

habido un error y que tampoco los tenían. Increíblemente esto nos pasó con hasta 4 empresas diferentes llegando a realizar el pago en alguna de ellas hasta que finalmente desistimos en nuestra intención de conseguir éste tipo de tubos.

Después de numerosas semanas de envíos fallidos e intentos no fructíferos de solucionar los contratiempos que nos surgían intentando conseguir tubos que respetaran los espesores y diámetros originales comenzamos a barajar la posibilidad de montar tubos de espesores diferentes.

5.3.2.2.2. ***Tubos y conectores de otros materiales sin respetar las medidas originales.***

En este punto debemos pensar cuales de las medidas debemos respetar y cuales podemos amoldar a nuestras necesidades, recordando que uno de nuestros mayores problemas es que los tubos que necesitamos tienen un espesor de pared excesivo si los comparamos con los utilizados normalmente en la industria. Teniendo en cuenta lo anterior debemos buscar la manera de realizar la instalación con tubos con espesores de pared más pequeños.

Respecto a la tubería de ascensión, tenemos que tener en cuenta que debe tener 65mm de diámetro exterior, por lo menos en la parte superior, justo donde se une con el cuerpo de la bomba ya que la unión con el cono de compresión (Plano C2095) tiene que realizarse a presión, de tal manera que sería imposible acoplar un tubo más ancho en este tramo, y si fuera más estrecho, se caería gran parte del agua al pozo antes de llegar al caño de la bomba.

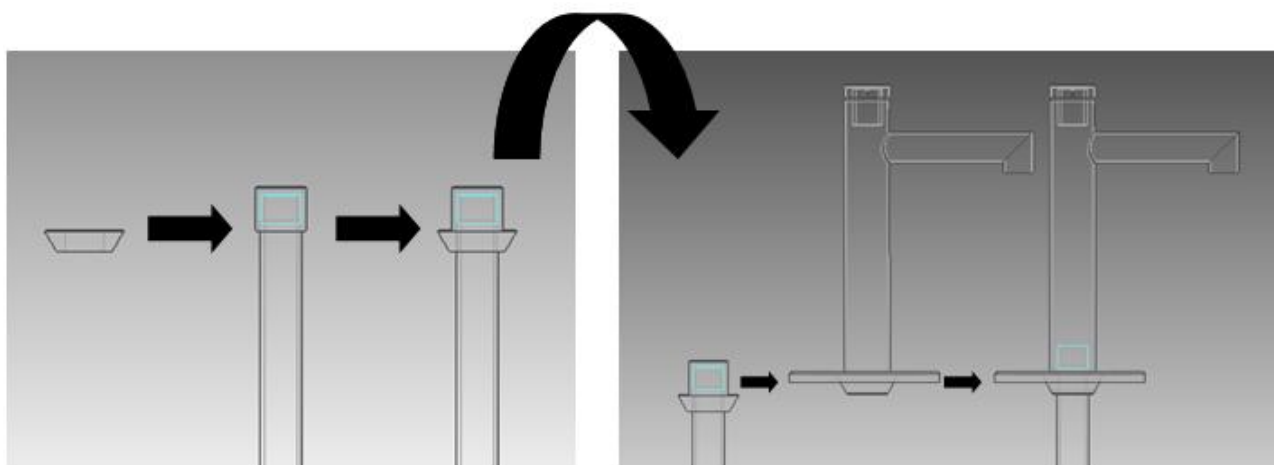


Figura 18: Secuencia de montaje del Cono de compresión (Plano C2095).

En cuanto al diámetro interior, debe ser igual al de los tubos con los que disponemos (51,4 mm) ya que si no, el sistema que sujeta la válvula de pie a la tubería y las juntas de estanqueidad situadas en ambas válvulas que impiden el paso del fluido entre la cámara de compresión y la tubería de ascensión o succión (Planos C5138/C1010) tendrían que ser revisadas, no pudiéndose garantizar la estanqueidad de la instalación ni el correcto emplazamiento de la válvula de pie y distorsionando de una manera perceptible datos importantes para el análisis de la bomba en condiciones similares a su utilización en campo, como caudales de pérdidas o fuerzas necesarias para sacar agua .

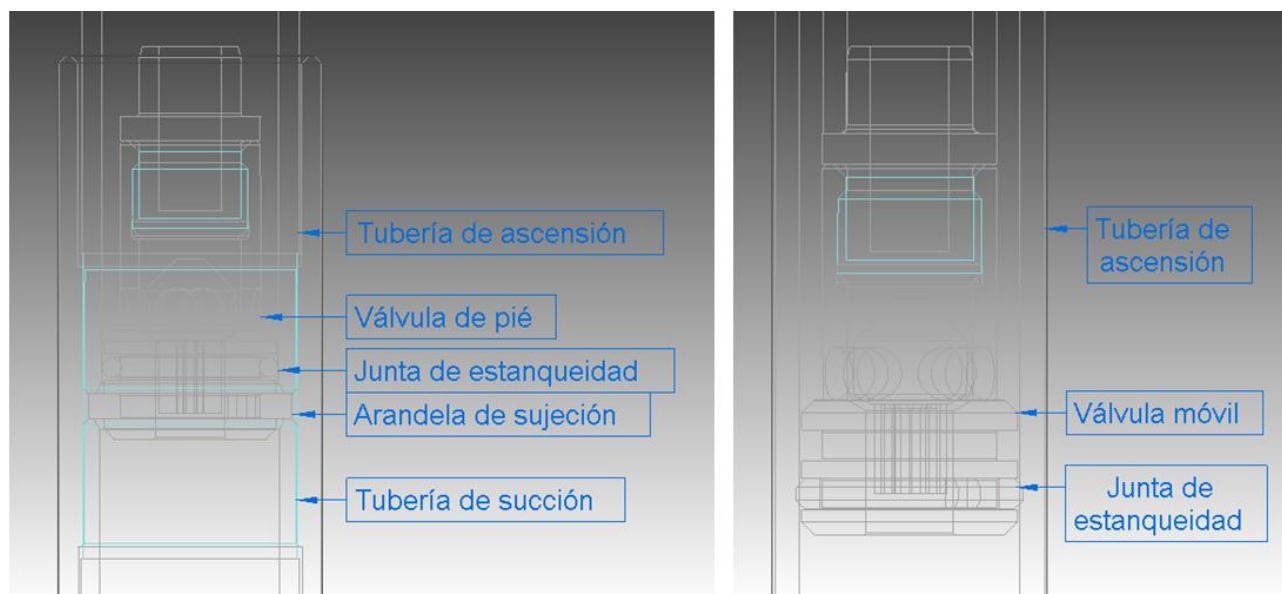


Figura 19: Detalle de los sistemas de estanqueidad en ambas válvulas y de sujeción en la válvula de pie.

También valoramos la opción de usar un tubo parecido al que necesitábamos pero que fuera más fácil de conseguir modificando los puntos críticos donde realmente hace falta que el tubo tuviera una determinada medida, y descartando en éste momento otros procedimientos. Pensamos en buscar tubos de otros espesores pero que tuvieran diámetros exterior o interior como los que necesitábamos pero los diámetros normalizados superior e inferior a 63mm en tubos de este tipo corresponden a 75 y 40mm , demasiado grande y pequeño respectivamente, llegando de nuevo por esta vía a un callejón sin salida.

Una vez valoradas las opciones anteriores nos encontramos en una encrucijada en cuanto a la fabricación del fragmento que nos falta de la tubería de ascensión aunque este fue el momento en el que tuvimos la suerte que tanta falta nos hubiera hecho en los meses anteriores.

Desesperados por el hecho de no encontrar tubos con las medidas que necesitamos comenzamos a valorar la posibilidad de adquirir un tubo de PVC de 63mm de diámetro y el máximo espesor de pared que nos pudieran suministrar para posteriormente incrementar éste con algún tipo de material moldeable que se endureciera, por lo menos en el tramo de tubo en el que la válvula móvil hacía su recorrido. Mientras tanto nos dedicamos a enviar correos a algunas empresas a las que aún no habíamos consultado sin ninguna convicción de que sirviera para algo aunque sorprendentemente una de ellas nos respondió algo que “solucionó” de una vez por todos nuestros problemas. Aseguraban que podían proporcionarnos tubo de HDPE PE-80 de 63mm de diámetro y $5,8\text{mm}$ de espesor de pared similar a los que teníamos desde un primer momento y que además nos podían roscar los extremos y todo ello con un presupuesto mucho más ajustado que las otras empresas a las que habíamos ido a preguntar anteriormente.

Pedimos el nuevo tramo de 424cm porque para la instalación en el segundo piso no podíamos usar la pieza de 24cm que habíamos usado en las instalaciones del primer piso ya que solo tenía rosca en un extremo. No sin algún problema más de mucha menor importancia, finalmente recibimos el tubo para realizar nuestra segunda instalación.

Si atendemos a la varilla, consideramos que su diámetro exterior debe conservarse para garantizar presiones, tiempos y caudales de ascensión de agua similares a los de la bomba en una situación de funcionamiento real, pero en éste caso no pasa lo mismo con el diámetro interior ya que, como debemos fabricar los conectores artesanalmente, podemos hacerlos para que encajen en un tubo con un espesor de pared menor que el original. Lo único que tendríamos que tener en cuenta en éste caso sería el peso que tendrían las piezas si fueran del mismo material que las que tenemos y solucionar la diferencia teniéndola en cuenta en los cálculos, como finalmente se hizo, o físicamente, poniendo un peso o contrapeso en nuestro nuevo tubo simulando el peso del tubo original.

Finalmente, zanjamos el problema de la varilla con un tubo de PVC PE-100 PN-16 de 40mm de diámetro y cilindro macizo de PVC PE-100 del mismo diámetro para los conectores, que mecanizarían los técnicos de la universidad ya que ahora sí que sabíamos la medida de la rosca. Además podríamos utilizar una pieza fabricada de este modo para el primer montaje, Opciones 3 y 4.

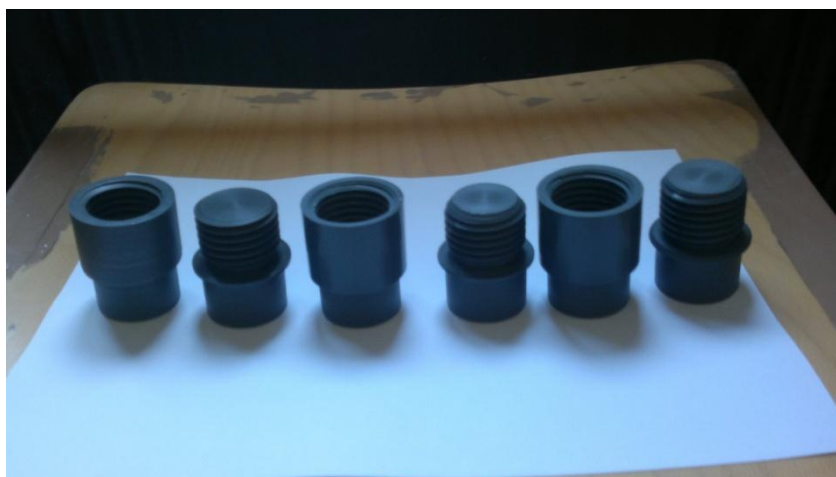


Ilustración 8: Conectores artesanales.

Para obtener una visión exacta de lo que fue el montaje de la varilla en esta ocasión, comentaremos que había partes de ella indispensables para la instalación, como el tramo superior de 0,5m, que debía ser el recibido de fábrica por contener un conector especial para alojar el “anillo de seguridad” y ser más resistente que los de PVC o por supuesto, la válvula móvil; por los que debíamos mecanizar roscas para acoplarlos a los nuevos tubos de PVC (conectores artesanales). Pero para las uniones entre tubos de PVC no hacían falta uniones especiales así que consultamos a los técnicos del departamento cuál sería la opción más económica para realizar dichas conexiones.

Debíamos tener en cuenta que la varilla se debe mover libremente dentro de la tubería de ascensión y por esto desechamos la opción de la unión de tres piezas (el diámetro máximo de la unión es mayor que el de los tubos a unir). Así pues solo nos quedaba la alternativa de utilizar terminales roscados como modo de ensamblaje. Sabíamos que el diámetro de la rosca nos era indiferente siempre que no fuera mayor que el diámetro de la varilla y el departamento tenía numerosos ejemplares de este tipo de terminales ya que son comúnmente utilizados en sus instalaciones.

El único contratiempo en este punto lo encontramos en el hecho de que no había ninguno que encajase en el diámetro interior del tubo que íbamos a utilizar aunque dichos

Características de las instalaciones

técnicos ofrecieron rápidamente la solución mecanizando casquillos de dos diámetros (diámetro interior de los terminales roscados/diámetro interior de la varilla de PVC) con el cilindro macizo de PVC y 40mm de diámetro que adquirimos para fabricar los conectores artesanales.



Ilustración 9: Terminales roscados y casquillos.

Características de las instalaciones

A continuación ofreceremos un gráfico explicativo de los tubos y la ubicación de los nuevos conectores de la varilla para esta instalación.

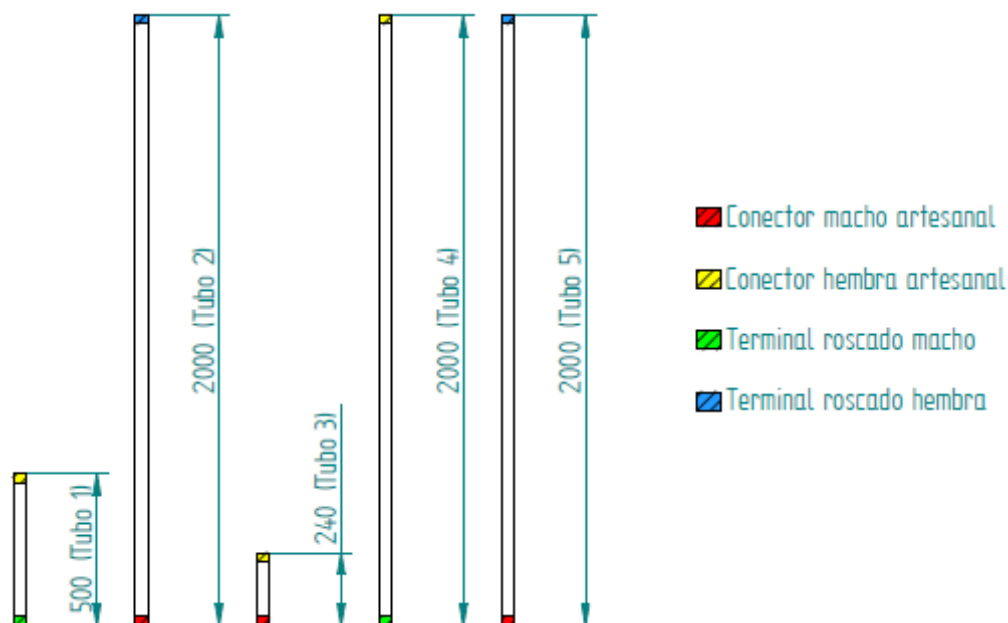


Figura 20: Croquis de la ubicación de los nuevos conectores en los tubos que componen la varilla para la instalación en el segundo piso del laboratorio.

En la Figura 20 se muestran solo los tubos de PVC necesarios para la instalación en el segundo piso, su longitud total ensamblados será 0,5 m menor que la de la varilla completa; distancia correspondiente al tubo de HDPE indispensable para el montaje anteriormente mencionado. La secuencia de montaje empezando desde la válvula móvil sería:

- Válvula móvil - Tubo 3 - Tubo 2 - Tubo 1 - Tubo 5 - Tubo 4 - Tubo 0,5m HDPE

Los Tubos 1,2 y 3 tienen esas medidas para poder ser utilizados en el Primer montaje, Opción 4. Así como en el Primer montaje, Opción 3, si nos referimos únicamente al Tubo 3.

Características de las instalaciones

Para terminar con éste apartado resumiremos en una tabla el número de tubos y conectores de los que está compuesto éste segundo montaje así como sus medidas y materiales de los que están fabricados.

Pieza	Material	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Diámetro ext. (mm)	Cantidad	Especificaciones
Varilla	HDPE	500	5,5	40	1	La tenemos desde el principio
Varilla	PVC	2000	3,0	40	2	Conector hembra artesanal + Terminal roscado macho
Varilla	PVC	2000	3,0	40	1	Conector macho artesanal + Terminal roscado hembra
Varilla	PVC	500	3,0	40	1	Conector macho artesanal + Terminal roscado hembra
Varilla	PVC	240	3,0	40	1	Conector macho artesanal + conector hembra artesanal
Tubería de ascensión	HDPE PE-80	4240	5,8	63	1	Suministrada por empresa externa
Tubería de ascensión		1000	5,8	63	1	Pieza original
Tubería de ascensión		2000	5,8	63	1	Pieza original
Tubería de ascensión		500	5,8	63	1	Fabricada para la primera instalación

Tabla 19: Tubos necesarios para nuestro segundo montaje.

5.4. Montaje y mantenimiento de la bomba.

Se ha considerado que era necesario incluir este apartado en el documento a pesar de la sorprendente facilidad con la que la MALDA pasa de ser un simple montón de piezas sueltas a una bomba de agua manual de acción directa preparada para el funcionamiento, en éste sentido los diseñadores deben darse por satisfechos.

Cumple a la perfección con el significado del concepto VLOM en cuanto la sencillez con la que se ensamblan los componentes, esto hace además que el desmontaje en el hipotético caso en el que se necesitase reparar algún componente pudiera realizarse sin ningún problema sin necesidad de personal cualificado.

En cuanto al mantenimiento solo hay que asegurarse mensualmente de que todas las roscas estén bien apretadas para evitar la pérdida de componentes ya sea en el pozo, caso en el que se necesitarían piezas de recambio, o dentro de la tubería de ascensión cuando se tendría que desmontar toda la bomba si no se pueden pescar los componentes desde la superficie.

Anualmente debe efectuarse una inspección completa de la bomba en la que destaca un test de descarga fijado en 18 litros en 40 paladas completas. También es reseñable que la extracción de agua debe empezar como máximo en 10 paladas desde el comienzo del llenado de la columna de agua. Ambos requisitos dejaran de cumplirse solo cuando la bomba este considerablemente deteriorada con lo que si la comunidad de usuarios está familiarizada con la instalación deberían darse cuenta del mal funcionamiento de la bomba sin necesidad de esperar hasta los test anuales.

Para información más detallada sobre el algoritmo de montaje y el mantenimiento de la bomba, consultar Anexo 2.

6. Cálculos previos.

Antes de empezar a experimentar con nuestra bomba es necesario realizar algunos cálculos previos basándonos en el material del que disponemos.

Estableceremos modelos de caudales y fuerzas para posteriormente comparar los resultados con las pruebas empíricas llevadas a cabo y así comprobar si los parámetros presupuestos son los adecuados para caracterizar el funcionamiento de la MALDA. También podremos estudiar cuáles de dichos parámetros merecerían un estudio, si cabe, aún más exhaustivo en búsqueda de maximizar el rendimiento de nuestra bomba.

6.1. *Volumen desalojado, Modelo de Caudal.*

Para comenzar los cálculos del Modelo de Caudal recurriremos a la información ya ofrecida en el Apartado 4.2. para ayudarnos a entender el origen de las ecuaciones.

La bomba de acción directa es de doble efecto, es decir, se produce bombeo en ambas carreras. En la carrera descendente la válvula de pie permanece cerrada y la válvula del pistón permanece abierta dejando pasar agua al interior de la tubería de ascensión. La varilla en las bombas de acción directa tiene un diámetro próximo al de la tubería de ascensión lo cual provoca un desplazamiento de agua junto con el movimiento y que se traduce en el bombeo. El volumen de agua bombeado en esta carrera (e) es:

$$V_{bajada} = \pi \cdot \frac{D_{varilla}^2}{4} \cdot e$$

En la carrera ascendente se invierte la actuación de las válvulas, la de pie permanece abierta y la del pistón cerrada. Esto provoca que junto con el movimiento se desplace agua que desborda por el caño y que, mediante succión se llene de nuevo el cilindro. El volumen bombeado por carrera (e) es:

$$V_{subida} = \pi \cdot \left(\frac{d_{tuberia}^2 - D_{varilla}^2}{4} \right) \cdot e$$

Por lo que el volumen bombeado por carrera completa es la suma de ambos movimientos:

$$V_{total} = V_{bajada} + V_{subida} = 0,5127 + 0,3338 = 0,8466 \text{ l}$$

Resulta sencillo presuponer los caudales correspondientes a diferentes frecuencias de paleo conociendo la información calculada, multiplicaremos el volumen desalojado en cada palada por las paladas que se produzcan en la unidad de tiempo deseada. Además en un escenario ideal la altura de bombeo sería independiente del caudal, por lo que los caudales a las mismas frecuencias serían iguales en las instalaciones en el primer y segundo piso, así la ecuación característica de nuestro modelo de caudal pudiendo ser modificada dependiendo de la unidad de frecuencia elegida de forma inmediata:

$$Q = V \cdot f$$

En condiciones normales la frecuencia de aplicación en una bomba manual oscila entre 40 – 50 paladas por minuto dependiendo de la ergonometría y profundidad de bombeo según la SKAT. Nosotros estudiaremos caudales teóricos en todo el rango de frecuencias de funcionamiento. Atendiendo a la siguiente ecuación y considerando un rendimiento volumétrico por encima del 90% se presenta el siguiente gráfico:

$$Q_r = \eta_v \cdot Q_i$$

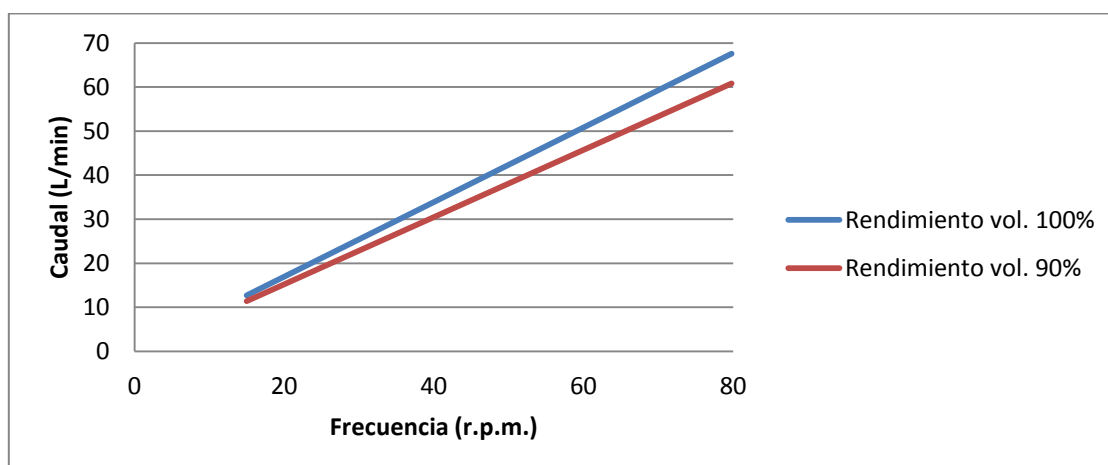


Gráfico 5: Caudal teórico vs frecuencia.

Se ha considerado expresar las unidades de frecuencia en revoluciones por minuto por ser de uso común, aclararemos que es equivalente a expresarlas en paladas por minuto entendiendo que una palada correspondería a una revolución del eje de la manivela si la varilla estuviera accionada por un mecanismo biela-manivela.

6.2. Modelo de Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.

Para la modelización de este parámetro comenzaremos desarrollando la segunda ley de newton:

$$\sum F = m \cdot a$$

Consideramos que el movimiento de la varilla se realiza a velocidad constante para ambas carreras (aceleraciones nulas) y planteamos el equilibrio de fuerzas considerando 4 puntos de control

que nos servirán de referencia en cuanto al cálculo de presiones. El Punto número 1 (P_1) está situado en la columna de agua justo después de la válvula móvil, tomando como referencia la dirección del flujo de agua la cuál consideraremos desde ahora y hasta el final del desarrollo, el Punto número dos (P_2) se encuentra justo antes de la válvula móvil en la cámara de compresión.

Los Puntos número 3 y número 4 (P_3 y P_4) se encuentran en la cámara de compresión y en la tubería de succión respectivamente, inmediatamente aguas abajo e inmediatamente aguas arriba de la válvula fija como se muestra en la siguiente figura.

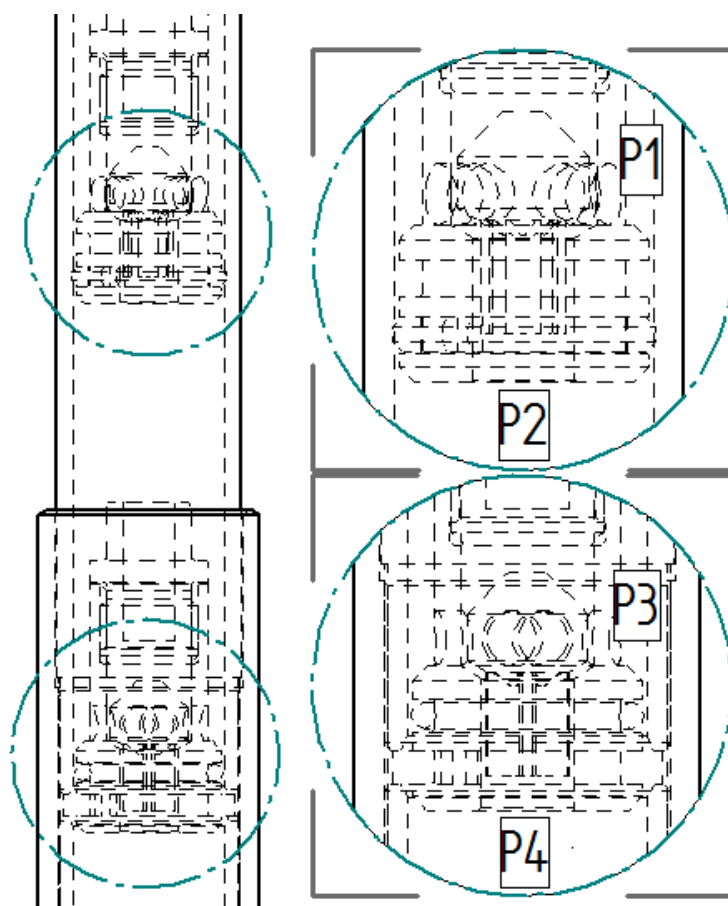


Figura 21: Posiciones de los puntos de referencia para el desarrollo del modelo.

A todo lo anterior podemos añadir que trabajaremos con presiones manométricas ya que la acción directa o indirecta de la presión atmosférica será similar en todos los puntos de control con tan escasa diferencia de alturas. También aclararemos los siguientes conceptos, indispensable para el correcto entendimiento del desarrollo:

— $A_1 \Rightarrow$ Área de la sección mojada de la cámara de compresión (diámetro interior de la tubería de ascensión).

— $A_2 \Rightarrow$ Área de la sección mojada de la tubería de ascensión (diferencia entre A_1 y el diámetro exterior de la varilla).

— $P_{componentes} \Rightarrow$ Peso de los componentes de la varilla y elementos de medición/control si se han utilizado.

Cálculos previos

$-F_{aplicada} \Rightarrow$ Fuerza aplicada para el funcionamiento de la bomba en cada carrera.

También deberemos caracterizar las alturas que utilizaremos en el desarrollo. Utilizaremos dos orígenes de coordenadas diferentes, el primero lo denominaremos con el subíndice x_1 y tendrá su origen en la parte inferior de la columna de agua en la tubería de ascensión. El segundo, denominado por el subíndice x_2 , tendrá su origen en la base de la cámara de compresión como observamos en la siguiente figura:

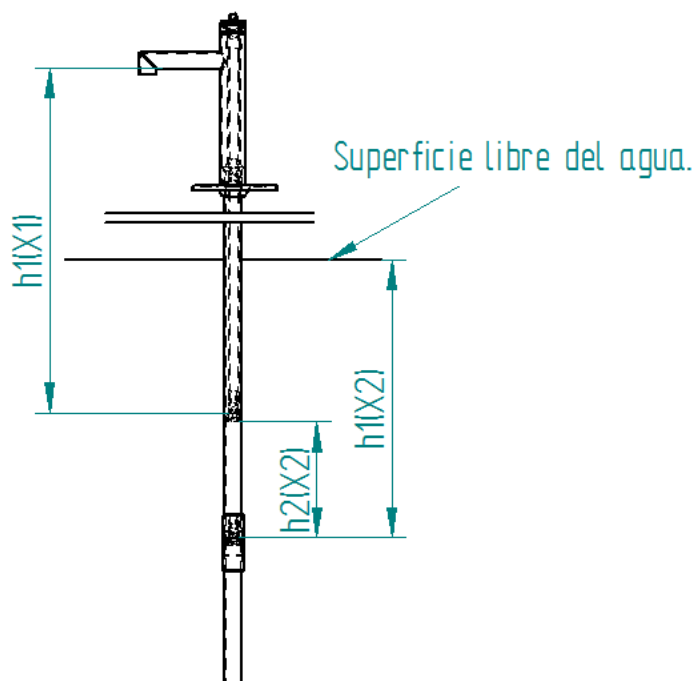


Figura 22: Esquema alturas para el desarrollo del modelo.

Aclarados los términos que utilizaremos comenzaremos con el desarrollo de la ecuación para el modelo en la carrera de bajada:

$$\begin{cases} m \cdot a = 0 \\ m \cdot a = P_2 A_1 - P_1 A_2 - P_{componentes} - F_{aplicada} \end{cases} \Rightarrow P_2 A_1 = P_1 A_2 + P_{componentes} + F_{aplicada}$$

De la ecuación resultante conocemos las áreas A_1 y A_2 , el peso de los componentes ($P_{componentes}$) y la presión en el Punto 1 que corresponde a la presión hidrostática ejercida por la columna de agua, $P_1 = \rho g h_1(X_1)$.

A su vez desconocemos la fuerza aplicada ($F_{aplicada}$) que es el término que queremos hallar y la presión en el Punto 2 (P_2)

Utilizaremos en este punto la ecuación de Bernoulli, mostrada a continuación, con la que se puede calcular la pérdida de carga que sufre un fluido al pasar por un conducto. Con ella relacionaremos la diferencia de presiones con un término en el que aparece la velocidad, que podremos calcular conociendo el tiempo invertido en la carrera y el área de paso del agua en las válvulas.

$$\underbrace{\left(p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot Z_2\right)}_{P_2} - \underbrace{\left(p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot Z_1\right)}_{P_1} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \sum K_i$$

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \sum K_i$$

El término K se denomina Coeficiente de Pérdida de Carga, se calcula empíricamente mediante experimentos de medición de pérdidas de carga en conductos y puntos singulares concretos. En nuestro caso resulta bastante difícil determinar el valor exacto de K por la singularidad de la fisonomía de nuestras válvulas, no obstante, después de consultar varias tablas de valores en diferentes puntos singulares estimaremos un valor de $K = 2$.

Estableceremos dos velocidades diferentes, v_1 y v_2 , siendo éstas las velocidades de paso del fluido por la válvula móvil y la válvula fija respectivamente. Para simplificar nuestros cálculos consideraremos ambas de igual valor pero en la realidad solo serían similares a muy bajas frecuencias de funcionamiento. A frecuencias de extracción normales es muy probable que v_2 sea menor que v_1 .

Con todo lo anterior obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} P_2 A_1 = P_1 A_2 + P_{componentes} + F_{aplicada} \\ P_1 = \rho g h_1(X_1) \\ P_2 - P_1 = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K \Rightarrow P_2 = P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K \Rightarrow P_2 = \rho g h_1(X_1) + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K \Rightarrow \end{cases}$$

$$\Rightarrow \left(\rho g h_1(X_1) + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K \right) A_1 = \rho g h_1(X_1) A_2 + P_{componentes} + F_{aplicada} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho g h_1(X_1) (A_1 - A_2) + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K A_1 = P_{componentes} + F_{aplicada}$$

En éste punto solo nos queda despejar la fuerza aplicada para obtener la ecuación que buscamos para nuestro modelo, no obstante, descomponemos en este momento algunos de los factores para presentar de una manera más clara las fuerzas que según nuestro modelo intervienen en la carrera de bajada.

$$F_{aplicada} = \underbrace{\rho g h_1(X_1) (A_1 - A_2)}_{\mathcal{A}} + \underbrace{\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K A_1}_{\mathcal{B}} - P_{componentes}$$

A continuación se presenta una breve explicación de las fuerzas que intervienen en la carrera de bajada según nuestro modelo:

· *Fuerza por principio de Arquímedes*, (\mathcal{A}). El principio de Arquímedes dice que todo cuerpo sumergido en un fluido sufre una fuerza de flotación igual al volumen de líquido desalojado por la densidad del mismo. Su dirección es contraria a la fuerza de accionamiento en la carrera de bajada.

· *Pérdida de carga en la válvula, (B)*. Pérdida de carga puntual producida por el paso del agua por la válvula, determinada por la ecuación de Bernoulli, provoca un aumento de la fuerza necesaria para pasar el fluido de la cámara de compresión a la tubería de ascensión y depende de la velocidad. Su dirección es siempre contraria al movimiento del fluido.

· *Fuerza por peso de los componentes*. El conjunto de varillas, válvulas, accionador... tiene un peso que hay que mover. Va en la misma dirección que la fuerza de accionamiento en la carrera de bajada.

Por otro lado, para calcular la ecuación que caracterice nuestro modelo en la carrera de subida necesitaremos relacionar la presión existente en el Punto 1, que es la zona de aplicación de la fuerza, con las presiones en los Puntos 3 y 4 por lo que de nuevo partiremos de el siguiente sistema de ecuaciones, nótese que la fuerza aplicada cambia de dirección y con ello de signo:

$$\begin{cases} m \cdot a = 0 \\ m \cdot a = P_2 A_1 - P_1 A_2 - P_{componentes} + F_{aplicada} \end{cases} \Rightarrow P_2 A_1 = P_1 A_2 + P_{componentes} - F_{aplicada}$$

Al igual que en el caso anterior conocemos la áreas A_1 y A_2 , el peso de los componentes ($P_{componentes}$) y la presión en el Punto 1 que corresponde a la presión hidrostática ejercida por la columna de agua, $P_1 = \rho g h_1(X_1)$.

Relacionando las presiones de nuestros puntos de control diremos que la presión en el Punto 3 la misma que en el Punto 2 mas la presión hidrostática del liquido contenido en la cámara de compresión y que presión en el Punto 4 es la correspondiente a la presión hidrostática experimentada por un elemento sumergido a una profundidad igual a la que está situada la válvula inferior. Teniendo esto en cuenta, despejando la presión en el Punto 2 de la anterior ecuación y aplicando de nuevo Bernoulli entre los Puntos 3 y 4 tenemos:

$$\begin{cases} P_2 = \rho g h_1(X_1) \frac{A_2}{A_1} + \frac{P_{componentes}}{A_1} - \frac{F_{aplicada}}{A_1} \\ \begin{cases} P_3 = P_2 + \rho g h_2(X_2) \\ P_4 = \rho g h_1(X_2) \end{cases} \\ P_4 - P_3 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K \end{cases} \Rightarrow \rho g h_1(X_2) - (P_2 + \rho g h_2(X_2)) = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho g h_1(X_2) - \left(\rho g h_1(X_1) \frac{A_2}{A_1} + \frac{P_{componentes}}{A_1} - \frac{F_{aplicada}}{A_1} + \rho g h_2(X_2) \right) = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{aplicada} = \underbrace{\frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K A_1}_C + \underbrace{\rho g h_2(X_2) A_1}_D + P_{componentes} + \underbrace{\rho g h_1(X_1) A_2}_E - \underbrace{\rho g h_1(X_2) A_1}_F$$

Seguimos con un breve análisis de las fuerzas que intervienen en la carrera de subida según nuestro modelo:

- *Pérdida de carga en la válvula, (C)*. Al igual que en la carrera de bajada, es pérdida de carga puntual producida por el paso del agua por la válvula, determinada por la ecuación de Bernoulli, provoca un aumento de la fuerza necesaria para pasar el fluido de la cámara de compresión a la tubería de ascensión y depende de la velocidad. Su dirección es siempre contraria al movimiento del fluido. En nuestros cálculos $(C) = (B)$ por considerar la misma velocidad de paso del agua en ambas válvulas.

- *Fuerza debida al factor de nivel de llenado de la cámara de compresión, (D)*. Como es lógico, la fuerza de aplicada en el movimiento de subida será proporcional a la cantidad de fluido existente en la cámara de compresión, necesitaremos más fuerza de succión en la cámara para su llenado cuanto mayor sea la cantidad de líquido descansando sobre la válvula. En nuestro modelo estableceremos el completo llenado de cámara para todos los casos a modo de simplificación y será igual a la distancia entre válvulas característica de cada instalación mas la mitad de la carrera, $h_2(X_2) = d_{\text{entre válvulas}} + l_{\text{carrera}}/2$. En realidad es muy probable que éste valor sea inversamente proporcional a la frecuencia a partir de ciertas paladas por minuto siendo éste menor que 1m a frecuencias normales de extracción.

- *Fuerza por peso de los componentes*. Como en el caso anterior, el conjunto de varillas, válvulas, accionador... tiene un peso que debe ser desplazado. En éste caso, en dirección contraria a la fuerza aplicada.

- *Fuerza por ascensión de la columna de agua, (E)*. En la carrera de subida, con la válvula del pistón cerrada hay que elevar el peso de la columna de agua en la carrera de subida. La dirección de ésta fuerza es contraria a la dirección de la fuerza de accionamiento aplicada.

- *Fuerza debida al factor de profundidad de instalación de la válvula fija, (F)*. La presión hidrostática registrada en la parte inferior de la válvula móvil favorece al movimiento ascendente de la varilla, así pues, Su dirección es la misma que la fuerza de aplicación en la carrera de subida. En nuestro modelo estableceremos una profundidad de montaje $h_1(X_2) = 1m$ en todos los casos para simplificar los cálculos.

De manera adicional comentaremos que al contrario de lo que puede parecer, la *Fuerza de Arquímedes* contraria al movimiento en la carrera de bajada no aparece en la carrera de subida, a la vista de la ecuación de nuestro modelo. Si discurrimos detenidamente, nos daremos cuenta que en el momento en el que se cierra la válvula móvil para iniciar la carrera de subida la varilla hueca no tiene un medio líquido en el que flotar. En un montaje correcto de la bomba la varilla permanece solidaria a la válvula móvil en todo momento, que hace de base de la columna de agua en la carrera de subida.

Para entenderlo mejor podríamos imaginar un vaso que en vez de tener forma cilíndrica, únicamente fuera una corona de cilindro. Si llenásemos de agua dicho vaso no podríamos decir que el vidrio que compone el hueco del centro del vaso flotara pero indudablemente notaríamos la reducción de peso cuando quisiéramos levantarlo para beber.

Cálculos previos

Seguidamente detallaremos los pesos considerados para estimar las fuerzas de accionamiento divididos en dos tablas, una para hallarla de manera general considerando una instalación estándar y otra para hallarla de manera particular en nuestras instalaciones, todos nuestros ensayos están realizados con ambos tipos de elementos (explicación en el Apartado 11.):

Pieza	Peso (Kg)
Asidero con junta de plástico	0,9
Camisa	0,83
Tubo de 40mm de 0,5m con conectores (HDPE)	0,31
Tubo de 40mm de 2m con conectores (HDPE)	1,2
Tubo de 40mm de 3m con conectores (HDPE)	1,8
Stop ring (anillo de seguridad)	0,01
Válvula móvil	0,075

Tabla 20: Pesos de elementos utilizados en una instalación estándar.

Pieza	Peso (Kg)	Ensayos en los que lo hemos utilizado
Asidero con junta de plástico	0,9	Todos
Camisa	0,83	Todos
Tubo de 40mm de 0,5m con enganches (HDPE)	0,31	Primer montaje, opciones 1 , 2 y 3
Tubo de 40mm de 0,5m arreglado (HDPE)	0,36	Primer montaje, opciones 2 y 3 y segundo montaje.
Tubo de 40mm de 2m con enganches (HDPE)	1,2	Primer montaje, opciones 1, 2 y 3
Anillo de seguridad	0,01	Primer montaje, opciones 1, 2 y 3
Válvula móvil	0,075	Todos
Pieza 2 - Inst 1º piso - PVC - 2m Aprox.	1,17	Primer montaje, opción 4 y segundo montaje
Pieza 1 - Inst 1º piso - PVC - 0,5m Aprox.	0,335	Primer montaje, opción 4 y segundo montaje
Pieza 3 - Inst 1º piso - PVC - 24cm	0,25	Primer montaje, opciones 3 y 4 y segundo montaje
Pieza 4 - Inst 2º piso - PVC - 2m Aprox.	1,1	Segundo montaje
Pieza 5 - Inst 2º piso - PVC - 2m Aprox.	1,17	Segundo montaje
Abrazadera latón 40 mm de diámetro	0,023	Primer montaje, opción 4 y segundo montaje
Madera I	2	Primer montaje, opciones 1 y 2
Garrafa	1,135	Todos
Tensor I	0,3	Primer montaje, opciones 1 y 2
Tensor II	0,4	Primer montaje, opciones 3 y 4 y segundo montaje
Madera II	0,705	Primer montaje, opciones 3 y 4 y segundo montaje

Tabla 21: Pesos de elementos utilizados en nuestras instalaciones.

Como pueden observar, en la Tabla 21 hay varios elementos adicionales que aún no han sido especificados en ningún apartado, lo haremos en el Apartado 9. explicando el motivo de la implantación de cada uno de ellos. De momento se muestran solo para resaltar que han sido tomados en cuenta a la hora de hacer los cálculos. En un primer momento no lo hicimos pero ha sido necesario rehacer los cálculos preliminares después de los ensayos con los pesos de éstos nuevos elementos para que las comparaciones posteriores tengan sentido.

Como aclaraciones de la Tabla 21 diremos que:

- Podríamos haber hecho los cálculos de algunos de los elementos basándonos en sus densidades y volúmenes pero nos pareció más exacto pesarlos lo más limpio y seco posible ya que teníamos la oportunidad.
- El único peso calculado por medio de su volumen y densidad ha sido el del tubo de HDPE de 40mm de espesor y 3m de longitud porque no disponíamos de un ejemplar. Lo vamos a utilizar en los cálculos de la instalación estándar para seguir rigurosamente el manual de instalación, en el que si aparecen.
- Algunas de las medidas de los tubos de PVC son aproximadas porque lo que tuvimos en cuenta al hacer las piezas fue que la longitud total en ambas instalaciones fuera la correcta prestando menos atención a la exactitud de las medidas de los fragmentos en los que dividimos los tubos que teníamos.

Para resumir presentamos a continuación las fórmulas que utilizaremos para el cálculo de nuestro modelo:

-Carrera de bajada:

$$F_{aplicada} = \underbrace{\rho g h_1(X_1)(A_1 - A_2)} + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K A_1 - P_{componentes}$$

-Carrera de subida:

$$F_{aplicada} = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K A_1 + \rho g h_2(X_2) A_1 + P_{componentes} + \underbrace{\rho g h_1(X_1) A_2} - \rho g h_1(X_2) A_1$$

Para calcular los resultados de las fuerzas aplicadas utilizando las ecuaciones del modelo, como ya se ha dicho anteriormente, se han obtenido velocidades de paso del fluido por las válvulas a partir de las frecuencias de funcionamiento de la bomba a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{V_{\text{cámara de compresión}}}{A_{\text{orificio de paso en la válvula}} \cdot t_{\text{carrera}}}$$

Recordamos que aunque para nuestros cálculos hemos considerado valores de velocidades de paso del fluido igual para ambas válvulas y basados en la ecuación anterior, técnicamente solo podríamos estar seguros mediante éste método de la velocidad de paso del fluido por la válvula móvil. La velocidad de paso del fluido por la válvula fija debería calcularse de manera empírica.

Cálculos previos

Para calcular el diámetro del orificio de paso del fluido en las válvulas recurrimos a la siguiente figura:

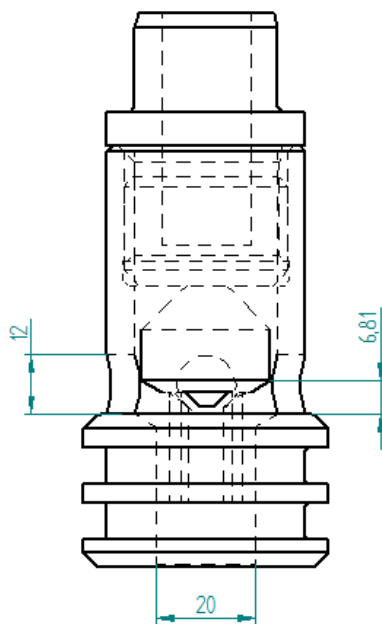


Figura 23: Esquema de los orificios de paso del fluido por las válvulas.

Se observa con claridad que con la válvula en posición totalmente abierta la bobina choca en la parte superior con el conector macho imposibilitando la total apertura de los cuatro orificios encargados de permitir el paso del fluido a la tubería de ascensión. En ésta posición consideramos que el espacio libre de los orificios es aproximadamente el mismo que habría si se produjera la total apertura de la válvula con orificios de la mitad del diámetro de los existentes. Serán 4 orificios de 6mm de diámetro, aun así aunque el área de paso del fluido en el punto de salida de la válvula es mayor al del orificio de entrada, la configuración en 4 orificios de pequeño tamaño es muy poco ventajosa en términos de pérdida de carga. Considerando al menor área de paso en el recorrido del fluido por la válvula y los reflujos que indudablemente se producen establecemos finalmente un área de paso equivalente al de un orificio de 15mm de diámetro para el cálculo de las velocidades.

Cálculos previos

A continuación presentamos los valores teóricos de fuerza aplicada necesaria en cada carrera a diferentes frecuencias de paleo y para cada una de nuestras instalaciones. Se muestra entre paréntesis el material del que está fabricado la varilla, para más información al respecto consular Apartado 5.. Se considerará expresar las unidades de frecuencia en revoluciones por minuto por ser de uso común, aclararemos que es equivalente a expresarlas en paladas por minuto entendiendo que una palada correspondería a una revolución del eje de la manivela si la varilla estuviera accionada por un mecanismo biela-manivela. También se muestran en segundos por carrera para la posterior comparación con valores experimentales.

	Frecuencias												
(segundos/carrera)	60,2	29,4	7,5	4,3	3,0	2,0	1,5	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
(r.p.m.)	0,50	1,02	4,02	7,02	10,02	15,00	19,80	30,00	40,20	49,80	60,00	70,20	79,80
Longitud de la varilla (cm)	F-(N) Carrera de bajada												
350(HDPE)	0,7	0,7	1,5	3,3	6,0	12,6	21,4	48,3	86,1	131,8	191,1	261,3	337,4
300(HDPE)	-2,9	-2,9	-2,1	-0,3	2,4	8,9	17,8	44,6	82,5	128,2	187,4	257,7	333,8
324(HDPE+PVC)	-2,4	-2,4	-1,6	0,2	2,9	9,4	18,3	45,1	83,0	128,7	187,9	258,2	334,3
324(PVC+HDPE)	1,0	1,1	1,9	3,6	6,3	12,9	21,7	48,6	86,5	132,2	191,4	261,6	337,8
724(PVC+HDPE)	28,0	28,1	28,9	30,6	33,3	39,9	48,8	75,6	113,5	159,2	218,4	288,7	364,8
Velocidades de paso por válvula 1 (m/s)	0,08	0,16	0,64	1,12	1,60	2,40	3,16	4,79	6,42	7,95	9,58	11,21	12,74
Longitud de la varilla (cm)	F+(N) Carrera de subida												
350(HDPE)	53,0	53,1	53,9	55,6	58,3	64,9	73,8	100,6	138,5	184,2	243,4	313,7	389,8
300(HDPE)	56,6	56,7	57,5	59,2	61,9	68,5	77,4	104,2	142,1	187,8	247,0	317,3	393,4
324(HDPE+PVC)	56,1	56,2	57,0	58,7	61,4	68,0	76,9	103,7	141,6	187,3	246,5	316,8	392,9
324(PVC+HDPE)	52,7	52,7	53,5	55,3	58,0	64,6	73,4	100,3	138,1	183,8	243,1	313,3	389,5
724(PVC+HDPE)	107,0	107,1	107,9	109,6	112,3	118,9	127,8	154,6	192,5	238,2	297,4	367,7	443,8
Velocidades de paso por válvula 2 (m/s)	0,08	0,16	0,64	1,12	1,60	2,40	3,16	4,79	6,42	7,95	9,58	11,21	12,74

Tabla 22: Fuerzas aplicadas por frecuencia según modelo.

Como breve comentario de la tabla anterior podemos destacar algunos valores de fuerzas aplicadas en la carrera de bajado de signo negativo, la varilla es capaz de bajar sola por debajo de aproximadamente 8 paladas por minuto con varillas cortas y de materiales pesados, condiciones que favorecen el movimiento descendente. Éste fenómeno también ocurre parcialmente en algunos casos en la carrera de subida pero en ninguno de ellos la varilla por si sola es capaz de llegar al punto muerto superior, esa es la causa de que no observemos ningún valor negativo entre los correspondientes a la carrera de bajada.

Si nos fijamos en las tres primeras medidas de varilla podemos apreciar la diferencia de fuerzas que es necesario aplicar en cada carrera para varias instalaciones de igual profundidad, pero diferente longitud de varilla (podemos considerar también que están fabricadas del mismo material), cuanto menor es la distancia entre válvulas, también es menor la fuerza aplicada necesaria en la carrera de subida para una frecuencia determinada. Penalizando la fuerza aplicada necesaria en la carrera de bajada con el mismo valor de fuerza. Ésta variación se produce de igual manera cuando para la misma longitud de varilla utilizamos materiales más ligeros que los originales, como era de esperar.

Seguidamente se ofrece un análisis detallado de las fuerzas calculadas a partir de cada sumando de los que se componen las fórmulas del modelo para poder analizar en profundidad, por

Cálculos previos

ejemplo, si son o no congruentes con la realidad, cuáles de ellas son más determinantes para los resultados o cuales son constantes o variables para una longitud de varilla determinada.

Iniciamos el estudio mostrando una tabla con valores constantes de nuestras ecuaciones para cualquiera que sea la frecuencia de funcionamiento de la bomba:

Long. varilla (cm)	Carrera de bajada	Carrera de subida			Ambas carreras
	$\rho gh_1(X_1)(A_1 - A_2)$ (N)	$\rho gh_2(X_2)A_1$ (N)	$\rho gh_1(X_1)A_2$ (N)	$\rho gh_1(X_2)A_1$ (N)	$P_{\text{componentes}}$ (N)
350	39,35	9,03	25,63	20,34	38,70
300	33,19	19,21	21,62	20,34	36,15
324	36,15	14,32	23,54	20,34	38,60
324	36,15	14,32	35,15	20,34	35,15
724	85,44	14,32	55,64	20,34	57,42

Tabla 23: Desglose de elementos de las ecuaciones del modelo con valores constantes para todas las frecuencias.

Se han señalado los valores que permanecen constantes para cualquier frecuencia en más de una longitud de varilla. Lógicamente esto ocurre, teniendo en cuenta nuestras simplificaciones, en el factor de llenado de la cámara de compresión cuando la distancia entre válvulas es la misma (varillas de 3324 y 724cm) y en el factor de profundidad de instalación de la válvula fija en todos los casos porque dicha profundidad es igual para todos los casos.

Comprobamos que todos los resultados tienen sentido, también tienen órdenes de magnitud aceptables y parecidas. Podríamos decir que todos los valores tienen una relevancia parecida en el resultado final y que a priori, no manifiestan claramente un error de cálculo.

Solamente existe un elemento, común en ambas ecuaciones, cuyos valores varían con la frecuencia de bombeo pero son independientes de la longitud y del material de fabricación de la varilla, es el que determina la pérdida de carga del fluido en su paso por las válvulas. Como ya hemos dicho anteriormente, consideramos que las velocidades de paso por ambas válvulas son iguales para cada frecuencia.

Cálculos previos

Dadas las características, utilizaremos la siguiente tabla para presentar la evolución de los datos:

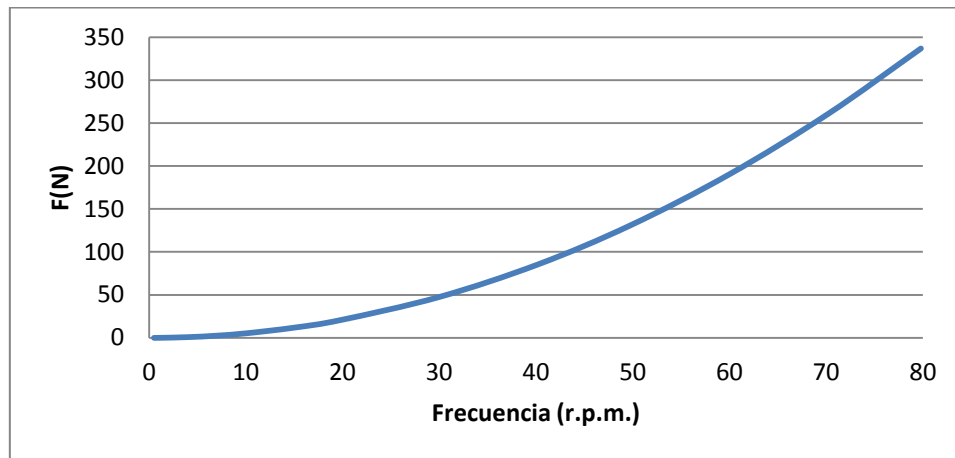


Gráfico 6: Evolución de los valores de $\frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K A_1$ con la frecuencia.

Según la gráfica los resultados parecen lógicos cobrando mucha mayor importancia a altas frecuencias, como era de esperar.

7. Proceso de ensayo y toma de datos.

Sin dejar de lado la importancia y el tiempo invertido en los apartados anteriores en los que hemos relatado las dificultades, posibilidades y soluciones relativas a los diferentes montajes que realizamos en nuestro laboratorio, podemos decir que a con éste apartado comenzamos la parte más importante del proyecto, para el que han merecido la pena todos los esfuerzos anteriores.

A continuación expondremos de qué modo hemos procedido para obtener los datos empíricos necesarios para compararlos con los datos teóricos obtenidos en los apartados anteriores tales como volúmenes de descarga a diferentes frecuencias, caudales de pérdida o fuerza necesaria para realizar la carrera.

Debemos recordar que el llamado primer montaje corresponde a una configuración con el cuerpo de la bomba anclado en el primer piso del laboratorio con profundidad del pozo igual a 383cm más 2cm de la base de madera. La superficie libre del agua se sitúa a 180cm medida desde el fondo del pozo.

Así como el llamado segundo montaje corresponde a una configuración con el cuerpo de la bomba anclado en el segundo piso del laboratorio con profundidad del pozo igual a 783cm más 2cm de la base de madera. La superficie libre del agua se encuentra a la altura antes mencionada sobre el fondo del pozo.

7.1. *Volumen desalojado, Caudal.*

La mecánica para la obtención de datos en este ensayo parecía bastante simple ya que lo único que teníamos que hacer era fijar unas frecuencias de referencia con las que trabajar y acoplar un caudalímetro al caño de la bomba.

Para fijar las frecuencias de referencia pensamos que lo mejor sería trabajar con las mismas que aparecían en los cálculos teóricos de otras fuentes ya que consideramos a un rango aceptable de funcionamiento.

Refiriéndonos a los ensayos realizados, aclararé que consideramos que el caudal no variaría independientemente del material que utilizáramos para la varilla, como sería de esperar. Tanto el HDPE como el PVC tienen superficies muy lisas así que, aunque para un cálculo más exacto deberíamos considerarlo, en nuestro caso íbamos a utilizar un cronómetro como referencia mientras una persona sacaba agua de la bomba manualmente para hacerlo a frecuencias determinadas. Por lo tanto las diferencias de caudal debidas a la variación de los fenómenos causados por el contacto del agua con las superficies de los citados materiales serían inapreciables.

Las frecuencias elegidas citadas anteriormente corresponden a los valores 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 paladas/min . Intentamos que las paladas fueran todo lo uniformes que pudimos lograr. Contando en este experimento con la gran ayuda de un compañero, y sabiendo cuantas paladas teníamos que dar en 10 o 15 segundos dependiendo de la frecuencia con la que estuviéramos trabajando, uno extraía agua y contaba las paladas mientras el otro, con un cronómetro, le iba

Proceso de ensayo y toma de datos

diciendo si la velocidad era correcta o tenía que modificarla de alguna manera hasta completar un minuto.

Creo que de este modo, podemos considerar que los caudales recogidos son bastante exactos ya que los intervalos del minuto en lo que paleábamos un poco más rápido se compensan con los que paleábamos un poco más lento haciendo que la media sea bastante fiel a la realidad.

También tuvimos en cuenta que la bomba estuviera completamente llena antes de empezar los ensayos.

Con todo lo anterior considero que los datos obtenidos se acercan mucho a si lo hubiéramos hecho con un método más exacto, como por ejemplo con un mecanismo que permitiera que un motor eléctrico accionara la bomba.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Frecuencia (paladas/min)	Volumen desalojado (l/min) piso de abajo	Volumen desalojado (l/min) piso de arriba	Observaciones	Velocidad (m/s) piso de abajo	Velocidad (m/s) piso de arriba
15	11	7,6	-	2,24141E-09	1,54861E-09
20	15	12,7	-	3,05646E-09	2,58781E-09
30	22,5	24,45	-	4,5847E-09	4,98204E-09
40	30,8	30,9	-	6,27594E-09	6,29632E-09
50	40,8	41,5	Empieza a tirar agua por el orificio superior.	8,31358E-09	8,45622E-09
60	47,6	47,2	Tira muchísima agua por el orificio superior.	9,69918E-09	9,61767E-09
70	48,2	48	Ensayo nulo.	9,82144E-09	9,78069E-09
80	-	-	Ensayo no realizado	-	-

Tabla 24: Volúmenes de agua desalojados a frecuencias establecidas, distancia óptima entre válvulas (experimental).

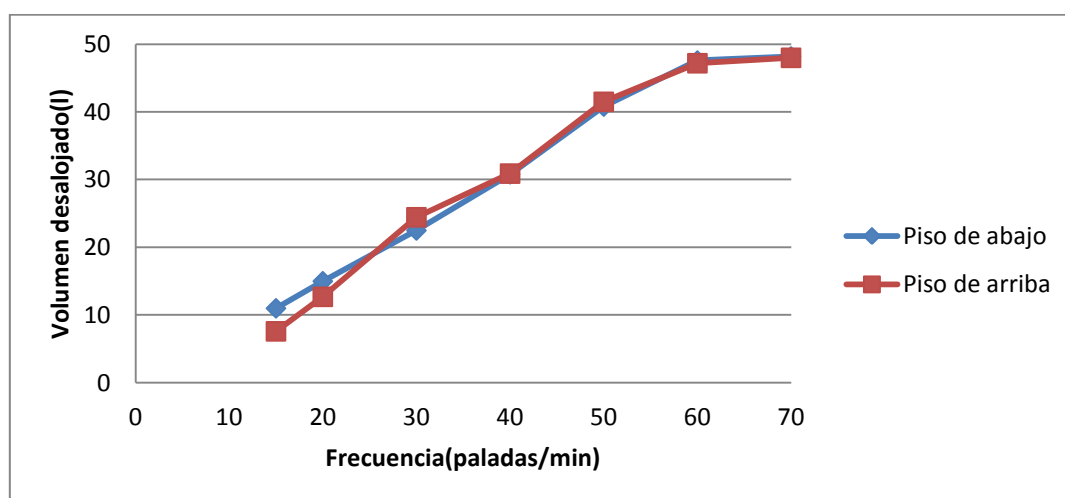


Gráfico 7: Volumen desalojado Vs Frecuencia (experimental) a distancia óptima entre válvulas.

Proceso de ensayo y toma de datos

Como pueden observar, nos limitamos a realizar el ensayo hasta la frecuencia de 70 *paladas/minuto* ya que nos dimos cuenta de que a partir de 50, los resultados no servirían por dos motivos:

- Por el increíble desgaste físico a realizar para llegar a esas frecuencias.
- Por la cantidad de agua expulsada por el orificio superior del cuerpo de la bomba, no pudiéndose almacenar de ninguna manera.

También aprovechamos para comprobar si todas las instalaciones cumplían con la prueba de funcionamiento especificada en el manual de la bomba (Anexo 2), correspondiente extraer más de 20l de agua en 40*paladas* (1 *min*):

Longitud de la varilla(m)	Volumen desalojado(l)
3	31,8
3,24	30,8
3,5	30
7,24	30,9

Tabla 25: Comprobación test de descarga.

Proseguiremos con la determinación del caudal de pérdidas, presentamos en éste apartado únicamente las pérdidas en estático porque el único parámetro en relación con las pérdidas que podemos estudiar por sí solo, sin necesidad de compararlo con ningún valor de otro parámetro obtenido como ocurre con las pérdidas en estudio dinámico cuyos resultados se ofrecerán en el Apartado 7.1. .

7.1.1. Caudal de pérdidas en estático.

Si es sin duda evidente la importancia de la caracterización de pérdidas de caudal en cualquier instalación hidráulica, más lo es en nuestro estudio. La cantidad de esfuerzo invertido en la extracción de agua podría verse tremendamente incrementada si no minimizamos al máximo el caudal de pérdidas, lo que estaría directamente relacionado con la disminución de calidad de vida de los usuarios de la bomba.

Vista la importancia de la caracterización de éste caudal procederemos a su obtención lo más fielmente posible. Para ello, una vez que nos aseguramos de que todas las roscas de la instalación están perfectamente apretadas, nos disponemos a determinar cuáles son los puntos críticos de la instalación.

Desde un primer momento nos dimos cuenta que las dos válvulas no eran estancas al 100% ya que, aunque la tubería de ascensión tardaba bastante en vaciarse, al principio de la jornada siempre estaba vacía. Además, inspeccionando visualmente, nos dimos cuenta de que la junta que unía el cuerpo de la bomba con la tubería de ascensión estaba siempre mojada y se apreciaban pequeñas gotas precipitándose al depósito.

Así pues destacando el hecho de que las juntas que unían la tubería de ascensión eran perfectamente estancas si estaban bien apretadas, ya teníamos seleccionados nuestros puntos críticos.

Proceso de ensayo y toma de datos

La técnica utilizada para hallar el caudal no pudo ser más sencilla, a la vez que exacta. Utilizamos una regla graduada fijada a determinados puntos con una pinza y medimos el tiempo que tardaba el agua en bajar hasta dejar de estar en contacto con la regla para después resolver las siguientes ecuaciones:

Primero calculamos el volumen de pérdidas.

$$V_{p\acute{e}rdidas} = \pi \cdot \frac{D_{espec\acute{i}fico}^2}{4} \cdot l_{regla}$$

Posteriormente el caudal.

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = \frac{V_{p\acute{e}rdidas}}{t_{vaciado}}$$

A continuación explicaremos las particularidades para las medidas de cada punto crítico.

7.1.1.1. Caudal de pérdidas en la válvula de pie.

Para las pérdidas en la válvula de pie extrajimos la varilla y pusimos la regla en el borde superior de la tubería de ascensión.

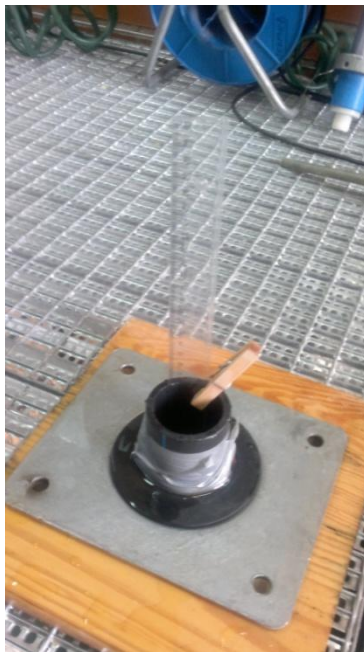


Ilustración 10: Método de obtención del caudal de pérdidas en la válvula de pie.

Nuestro diámetro específico correspondía al diámetro interior de la tubería de ascensión, $D_{espec\acute{i}fico} = 5,14 \text{ cm}$.

- Para la instalación del primer piso:

$$l_{regla} = 10 \text{ cm}$$

$$t_{vaciado} = 5,5 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{p\acute{e}rdidas} = 37,73 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,038 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

- Para la instalación del segundo piso:

$$l_{regla} = 15,8 \text{ cm}$$

$$t_{vaciado} = 2,75 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{p\acute{e}rdidas} = 119,21 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,12 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

7.1.1.2. Caudal de pérdidas en la válvula móvil.

Para el cálculo de este caudal pensamos que la mejor forma de hacerlo sería midiendo con las dos válvulas montadas ya que así serían las condiciones de funcionamiento de la bomba. No obstante, si los tiempos de descarga fueran muy próximos a los del subapartado anterior podríamos repetir el experimento sin la válvula fija.

Ante la imposibilidad de colocar una regla de forma efectiva en el hueco por el que asciende el agua con la varilla puesta, decidimos sumergir la válvula móvil hasta el final de la tubería de ascensión (atada con una cuerda para poder pescarla con facilidad posteriormente) y volver a colocar la regla del mismo modo que en el subapartado anterior. Así, nuestro diámetro específico vuelve a ser $D_{específico} = 5,14 \text{ cm}$.

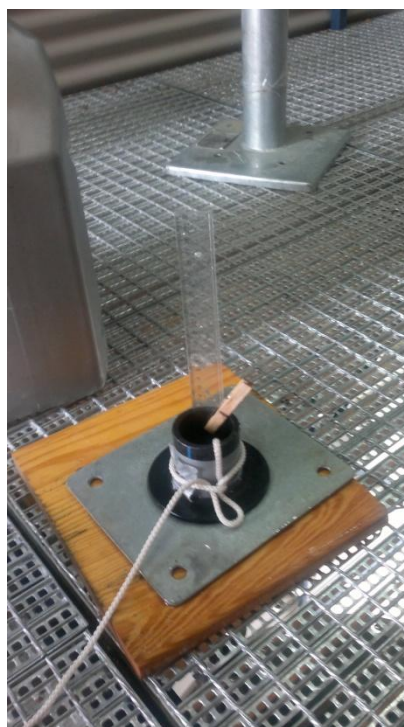


Ilustración 11: Método obtención del caudal de pérdidas en la válvula de móvil.

- Para la instalación del primer piso:

$$l_{regla} = 10 \text{ cm}$$

$$t_{vaciado} = 5,75 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{p\acute{e}rdidas} = 36,09 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,036 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

- Para la instalación del segundo piso:

$$l_{regla} = 15,8 \text{ cm}$$

$$t_{\text{vaciado}} = 3 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{\text{pérdidas}} = 109,28 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,11 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

7.1.1.3. Caudal de pérdidas en la junta cuerpo-tubería de ascensión.

En ésta caso volvimos a repetir la misma operación pero fijando la regla en el borde superior del cuerpo de la bomba. El problema entonces era que debíamos medir nuestro $V_{\text{pérdidas}}$ del mismo modo pero debíamos intentar hacerlo por debajo del caño de la bomba para evitar cuentas e inexactitudes innecesarias.

Para ello consultamos los planos C5136 y C5020 pertenecientes al cuerpo de la bomba y al encaje superior respectivamente, contenidos en el Anexo 1. Aclararemos que estas dos piezas vienen soldadas de fábrica y por eso no las desmontamos. De ellos obtuvimos que la distancia entre el punto donde íbamos fijar la regla y el borde inferior del caño era de $15,2 \text{ cm}$ y nuestro nuevo diámetro específico, $D_{\text{específico}} = 8,08 \text{ cm}$.

El último paso sería restar esos $15,2 \text{ cm}$ a la regla que utilizaríamos, la cual medía $29,5 \text{ cm}$ hasta el borde donde la fijamos en el caso de la instalación del primer piso y 30 cm en el caso de la instalación del segundo piso.

También aclararemos que realizamos el experimento con la válvula de pie montada porque desde el primer momento supusimos que las pérdidas por la válvula serían menores que por la junta. El último paso sería restar el caudal de pérdidas de la válvula al caudal de pérdida combinada (junta-válvula de pie) para obtener el caudal de pérdida específico de la junta.

- Para la instalación del primer piso:

$$l_{\text{regla}} = 29,5 - 15,2 = 14,3 \text{ cm}$$

$$t_{\text{vaciado}} = 12,5 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{\text{pérdida combinada}} = 58,66 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,059 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

$$\text{Si por la válvula inferior se pierden } 0,038 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

$$\rightarrow Q_{\text{pérdidas}} = 0,059 - 0,038 = 0,021 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

- Para la instalación del segundo piso:

$$l_{\text{regla}} = 30 - 15,2 = 14,8 \text{ cm}$$

$$t_{\text{vaciado}} = 5,25 \text{ min}$$

$$\text{Con lo que } Q_{\text{pérdida combinada}} = 144,55 \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right) = 0,145 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

$$\text{Si por la válvula inferior se pierden } 0,12 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

$$\rightarrow Q_{\text{pérdidas}} = 0,145 - 0,12 = 0,025 \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right)$$

Haciendo un análisis preliminar de los datos obtenidos, observamos que son coherentes con lo que se podría esperar. Los correspondientes a las válvulas aumentan con la profundidad y el correspondiente a la junta se mantiene casi constante.

Finalmente los caudales de pérdidas combinados cuando la columna de agua llega al caño del cuerpo de la bomba (altura de extracción) son:

- Para las instalaciones en el primer piso:

$$Q_p = \underbrace{0,036}_{\text{menor de los caudales de pérdidas en las valvulas}} + \underbrace{0,021}_{\text{caudal de pérdidas en la junta}} = 0,057 \text{ l/min}$$

- Para las instalaciones del segundo piso:

$$Q_p = \underbrace{0,11}_{\text{menor de los caudales de pérdidas en las valvulas}} + \underbrace{0,025}_{\text{caudal de pérdidas en la junta}} = 0,135 \text{ l/min}$$

7.2. *Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.*

Siendo conscientes de los resultados obtenidos con los modelos presentados en los apartados anteriores, nuestra misión en éste momento es recopilar datos reales de fuerzas aplicadas necesarias para el funcionamiento de la MALDA. Teniendo en cuenta que necesitamos valores a diferentes frecuencias de funcionamiento para cada una de nuestras instalaciones deberemos pensar cuál es el mejor modo de relacionar fuerzas aplicadas con tiempos de accionamiento.

La solución menos complicada es determinar los tiempos invertidos por la varilla en el recorrido completo de ambas carreras bajo la acción de fuerzas conocidas en cada instalación, de ésta manera obtendremos la relación deseada con lo que procedemos de la siguiente manera.

7.2.1. *Carrera de bajada.*

Para éste primer test, a priori, el más sencillo pensamos que lo más fácil sería medir con el cronómetro el tiempo que tarda la varilla en recorrer la carrera de bajada comenzando con su propio peso para posteriormente ir añadiendo objetos con peso conocido, con lo que el tiempo invertido en realizar la carrera iría disminuyendo.

En un primer momento pensamos en colgar una garrafa de agua al mango de la bomba para ir llenándola progresivamente pero rápidamente nos damos cuenta de que si centramos mucho la garrafa, ésta roza con el cuerpo de la bomba y si la colgamos menos centrada para que no roce, la varilla sufre mucho al estar el peso demasiado lejos del correcto punto de aplicación de la fuerza, idealmente en el centro de la circunferencia que forma el perfil de la sección de la varilla. Además las lecturas no son correctas ya que se produce un mayor rozamiento de la junta de la válvula móvil con la tubería de ascensión. Así que hayamos la solución fabricando artesanalmente una plataforma de aglomerado en la que se pudiera apoyar la garrafa con garantías lo más cerca posible del punto ideal de aplicación de las fuerzas de accionamiento.



Tabla 26: Método obtención de datos de fuerza aplicada en la carrera de bajada.

Así pues, fuimos tomando medidas de tiempo a la vez que íbamos llenando la garrafa con volúmenes determinados de agua.

Proceso de ensayo y toma de datos

Procedemos a realizar el experimento con todas las opciones propuestas para el primer montaje así como en el segundo montaje del mismo modo (Aparado 5.3.):

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	No baja	Rozamiento.
2,3	3	-
3,435	1,5	-
5,035	1	-

Tabla 27: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 1.

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	No baja	Rozamiento.
2,3	No baja	Rozamiento.
3,435	19	Rozamiento.
5,035	2	-
6,635	1	-

Tabla 28: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 2

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	No baja	Con 120 segundos faltan 13,5cm.
1,105	4,5	-
2,24	3	-
3,24	1,5	-
4,24	1	-
5,24	1	-
6,24	1	-
7,24	0,8	-

Tabla 29: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 3.

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	No baja	Rozamiento.
1,105	2	-
2,24	2	-
3,24	2	-
4,24	1	-
5,24	1	-
6,24	1	-
7,24	0,5	-

Tabla 30: Pesos carrera de bajada Primer Montaje, Opción 4.

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	No baja	Rozamiento.
1,105	120	-
2,24	10	-
3,24	2,5	Se normaliza la bajada.
4,24	2,5	-
5,24	1,5	-
6,24	1	-
7,24	1	-
8,24	1	-
9,24	1	-
10,24	1	-

Tabla 31: Pesos carrera de bajada Segundo Montaje.

Incluimos el siguiente gráfico para facilitar la lectura de los datos:

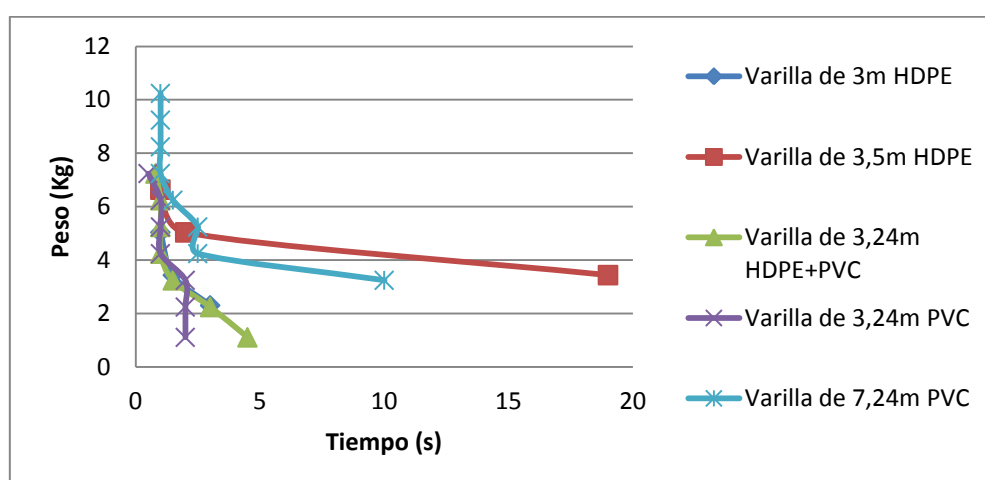


Gráfico 8: Fuerza aplicada Vs Tiempo invertido, carrera de bajada.

7.2.2. Carrera de subida.

Para este segundo test, pensamos que lo más sencillo sería aplicar el mismo método que en el apartado anterior. Lo único que tendríamos que hacer sería cambiar el sentido de aplicación de la fuerza, es decir, hacer que el peso de la garrafa junto con el del líquido correspondiente a cada ensayo hiciera subir la varilla de la bomba en lugar de bajarla.

Situándonos en el primer piso del laboratorio hallamos la solución con rapidez cuando nos dimos cuenta de que era posible anclar un objeto al techo con facilidad.

Para el primer montaje procedimos a utilizar una pequeña polea situada lo más próxima posible al centro de la circunferencia que forma el perfil de la sección de la varilla por la que pasamos una cuerda (escota); ésta se encontraba atada al asidero por uno de sus extremos y a la ya mencionada garrafa por el otro; pero a una altura tal que no interviniese en su movimiento de bajada con el de subida de la varilla.

Cabe mencionar que elegimos unos tipos de polea y de cuerda provenientes del mundo de la náutica debido a que ofrecían una extraordinaria resistencia a los esfuerzos con un espesor muy contenido y sin apenas rozamiento, lo cual nos resulta muy útil en nuestros ensayos.



Ilustración 12: Método obtención de datos de fuerza aplicada en la carrera de subida en el primer montaje.

Como en el ensayo anterior, fuimos llenando la garrafa progresivamente en cada una de las ya conocidas 5 configuraciones:

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
1,135	No sube	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
2,735	No sube	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
4,335	No sube	10 segundos hasta que se para (10cm).
5,935	No sube	7 segundos y después se para (1cm).
7,535	No sube	6 segundos y después se para (3cm).
9,135	13	-
10,735	7	-
12,335	6	-
13,935	3	-
15,535	2	-
17,135	1,5	-
18,735	1	-
20,335	1	-

Tabla 32: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 1.

Proceso de ensayo y toma de datos

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
1,135	No sube.	Motivos varios, muchos segundos sin reacción.
2,735	No sube.	Motivos varios, muchos segundos sin reacción.
4,335	No sube.	Tubo interior doblado, accionador gira/Polea no situada en la vertical exacta. (Explicación en el Apartado 11)
5,935	43	-
7,535	22	-
9,135	13	A partir de aquí la subida es más lineal, antes había tramos en lo que se aceleraba o se paraba.
10,735	7	-
12,335	5	-
13,935	3	-
15,535	2	-
17,135	1,5	-
18,735	1	-
20,335	1	-

Tabla 33: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 2.

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
1,135	No sube	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
2,135	75	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
3,135	27	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
4,135	15	-
5,135	7	Se normaliza la subida.
6,135	5,5	-
7,135	5,5	-
8,135	4,5	-
9,135	4,5	-
10,135	4	-
11,135	3	-
12,135	2,5	-
13,135	2	-
14,135	1,5	-
15,135	1	-
16,135	1	-
17,135	0,6	-

Tabla 34: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 3.

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
1,135	No sube	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
2,135	No sube	Rozamiento/Fuerza insuficiente para la succión.
3,135	13	-
4,135	9	-
5,135	7,5	-
6,135	7,5	-
7,135	7	-
8,135	7	-
9,135	6,5	-
10,135	4	-
11,135	4	-
12,135	3	-
13,135	3	-
14,135	1	-
15,135	1	-
16,135	1	-
17,135	1	-

Tabla 35: Pesos carrera de subida Primer Montaje, Opción 4.

Para el segundo montaje tuvimos que pensar en otra cosa ya que no teníamos techo donde anclar nuestra polea.

La manera óptima de proceder hubiera sido construir una estructura metálica en la que atar la polea lo suficientemente alta como para que el recorrido de la garrafa no interfiriera con el de la varilla de la bomba, pero pensamos que no merecía la pena invertir tanto tiempo y dinero en un ensayo si lo podíamos hacer de otra manera, quizá no con tanta precisión como lo hubiéramos hecho con la estructura metálica, pero si con garantías de obtener datos con una exactitud aceptable.

Con esta premisa, comenzamos a pensar cómo podíamos obtener los datos con los materiales con los que contábamos en el laboratorio. En primer lugar nos fijamos en una escalera de madera que usábamos para operar por la parte de debajo de las bombas, desde el piso inferior al que estaban ancladas y consideramos que podía ser una plataforma aceptable en la que atar la polea.

Proceso de ensayo y toma de datos

El siguiente problema lo encontramos para cumplir la condición de que la varilla y la garrafa no se interfirieran en su camino, para solucionar esto, nos dimos cuenta de que disponíamos de una polea extra colocada en otra de las bombas del laboratorio que ya no hacía falta, con la cuál podíamos cambiar la dirección de la fuerza dos veces para que así la garrafa y la varilla se movieran en distintos planos del espacio. El resultado se puede observar en la siguiente secuencia de imágenes:



Ilustración 13: Método obtención de datos de fuerza aplicada en la carrera de subida en el segundo montaje.

Optamos por dirigir el movimiento de la garrafa hacia la compuerta que daba acceso al segundo piso del laboratorio, lo que nos permitía un desplazamiento libre de ésta, además de una ejecución más rápida del ensayo al no tener que subir agua al segundo piso.

Pese a lo que pueda parecer, la estructura era considerablemente estable cuando las cuerdas estaban tensas, incrementándose progresivamente la tensión de las cuerdas y la estabilidad de la estructura a la vez que íbamos llenando de agua la garrafa. Éste experimento se

Proceso de ensayo y toma de datos

realizo muy cuidadosamente para asegurar la integridad estructural de los componentes como podemos observar en la Ilustración 13 instalamos una cincha con tensor de algodón amarilla que mantenía la escalera en posición estable contrarrestando la fuerza ejercida por la garrafa en el plano horizontal, lo que nos permitió ir adaptando la tensión de la misma a las solicitaciones requeridas cada vez que incrementábamos el peso del lastre.

De ésta manera obtuvimos los siguientes datos:

Peso(Kg)	Tiempo(s)	Observaciones
Sola	10	-
1,135	8,5	-
2,135	8	-
3,135	7	-
4,135	7	-
5,135	7	-
6,135	6	-
7,135	6	-
8,135	6	-
9,135	6	-
10,135	6	-
11,135	6	-
12,135	5	-
13,135	5	-
14,135	5	-
15,135	5	-
16,135	5	-
17,135	5	-
18,135	5	-
20,135	5	-

Tabla 36: Pesos carrera de subida Segundo Montaje.

Se incluye también el gráfico correspondiente para facilitar la interpretación de los resultados:

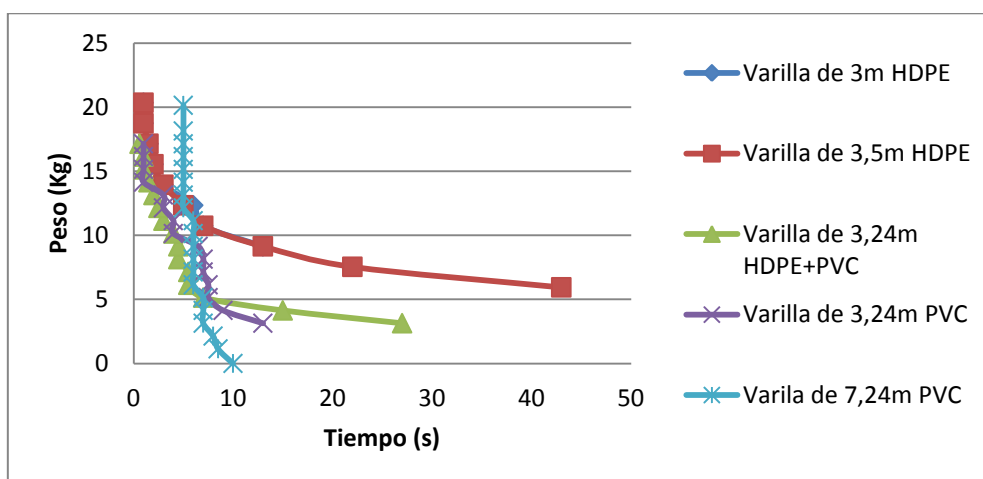


Gráfico 9: Fuerza aplicada Vs Tiempo invertido, carrera de subida.

Terminada la toma de datos relacionada con la fuerza para la extracción de agua, damos por finalizada la obtención de datos experimentales.

8. Resultados.

En el apartado en el que nos encontramos compararemos los resultados obtenidos a partir del modelo con los que recopilamos en nuestros ensayos. De éste modo podremos determinar la calidad de las ecuaciones obtenidas así como evaluar el funcionamiento de la bomba en las condiciones que nos ha sido posible reproducir.

8.1. Volumen desalojado, Caudal.

Evalutando los valores obtenidos en el modelo desarrollado comparados con los datos procedentes de nuestros experimentos (Apartados 6.1. y 7.1.) podemos afirmar que no erramos en nuestra predicción a cerca del gran rendimiento volumétrico que presenta la MALDA, mayor del 90% en frecuencias normales de funcionamiento como comentamos durante el desarrollo del modelo. Recordando la siguiente ecuación:

$$Q_r = \eta_v \cdot Q_i$$

Y teniendo datos de caudales reales e ideales mostramos la siguiente gráfica:

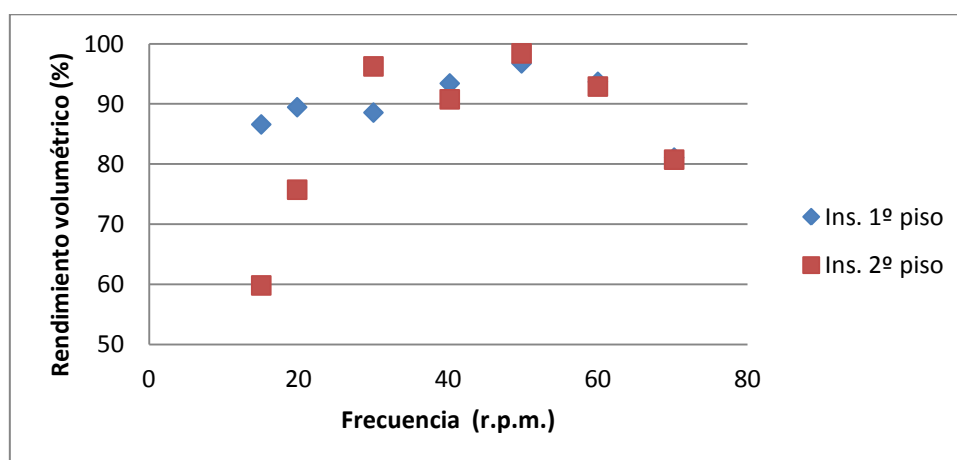


Gráfico 10: Rendimiento volumétrico, η_v vs frecuencia.

Recordamos que en Apartado 7.1. solamente aportamos datos de caudales de pérdida en estático por ser éstos los únicos que podíamos ofrecer de manera independiente al modelo. En éste apartado y a partir de los mismos datos de los que hemos partido para construir la anterior tabla y según la siguiente ecuación:

$$Q_p = Q_i - Q_r$$

Ofrecemos los valores de caudales de pérdida en dinámico:

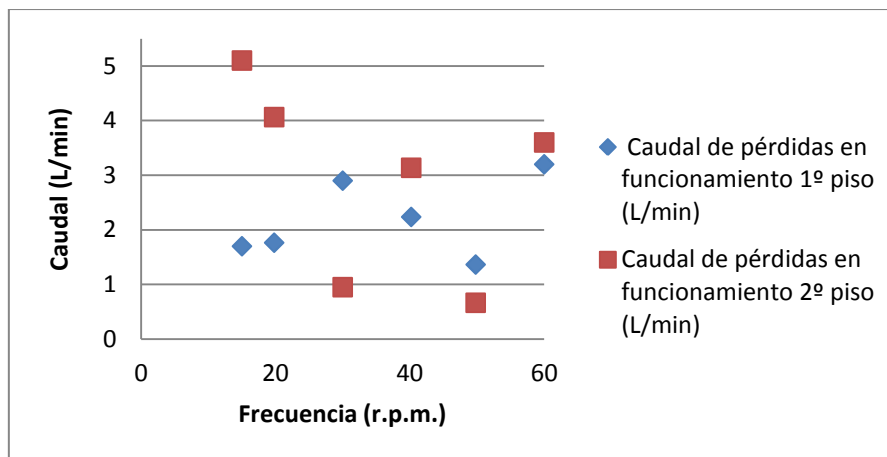


Gráfico 11: Caudal de pérdidas, Q_p vs frecuencia.

Como han podido apreciar en el Apartado 7.1., tomamos como referencia valores de frecuencias desde 15 a 80 r.p.m. En la anterior gráfica solo presentamos valores de caudales pérdidas en frecuencias hasta 60 r.p.m. por ser desorbitados a mayores frecuencias y considerarlos fuera del rango de estudio.

A modo de breve comentario diremos que no se aprecia tendencia alguna en los resultados obtenidos, tan solo podemos decir que todos los valores presentados están contenidos en un rango “aceptable” y repetir que se aprecia una disminución del caudal de pérdidas a frecuencias normales de funcionamiento.

Cabe mencionar para finalizar que los caudales de pérdida en estático con la tubería de ascensión totalmente llena (hasta el nivel del caño de la bomba), corresponden a 0,057 y 0,135 l/min para los montajes en el primer y segundo piso respectivamente, prácticamente irrelevantes atendiendo a los caudales de pérdidas en dinámico. Por ello podemos asegurar que los reflujos y fuerzas producidas en el interior del mecanismo de la bomba durante el funcionamiento propician un nada despreciable desajuste de ciertos componentes que disminuyen el rendimiento volumétrico de la MALDA.

8.2. *Fuerza aplicada necesaria para el accionamiento.*

Para cotejar las fuerzas calculadas y las conseguidas experimentalmente optaremos por graficar juntas las vinculadas a ambas fuentes en las carreras de subida y bajada por separado. En éste caso resulta más apropiado expresar las unidades de frecuencia en segundos por palada ya que, normalmente, el usuario de la bomba no invertirá exactamente el mismo tiempo en el recorrido de la carrera de subida que en la de bajada. De esta manera podremos analizar los resultados de forma más realista.

Analizaremos primeramente uno de los casos en el que nos resulte más fácil entender el significado de lo que aparece en las gráficas para posteriormente extrapolarlo a los demás. La opción elegida es el montaje en el primer piso del laboratorio, opción número 3, correspondiente a la instalación con varilla de 324 cm de longitud de los cuales están fabricados 300 cm con HDPE y

Resultados

24cm de PVC. Recordamos que es la instalación que más se acercaría a una instalación estándar por distancia entre válvulas y material de fabricación de la varilla.

Para comparar los resultados con más exactitud calculamos las fuerzas de aplicación teóricas a las frecuencias a las que tenemos los datos de fuerzas de aplicación reales con las ecuaciones del modelo, que recordamos a continuación:

-Carrera de bajada:

$$F_{aplicada} = \rho g h_1(X_1)(A_1 - A_2) + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} K A_1 - P_{componentes}$$

-Carrera de subida:

$$F_{aplicada} = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K A_1 + \rho g h_2(X_2)A_1 + P_{componentes} + \rho g h_1(X_1)A_2 - \rho g h_1(X_2)A_2$$

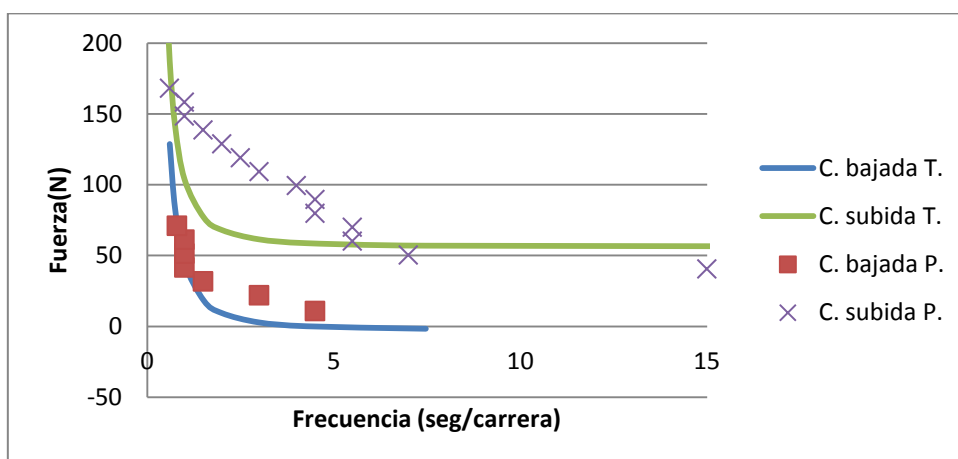


Tabla 37: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 324cm (HDPE+PVC).

Fuerzas modelo (N)	$\rho g h_1(X_1)(A_1 - A_2)$	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
	$-P_{componentes}$	-38,6	-38,6	-38,6	-38,6	-38,6	-38,6	-38,6
	$\frac{\rho \cdot v_2^2}{2} K A_1$	2,4	5,3	21,2	47,6	47,6	47,6	74,4
	TOTAL	-0,1	2,8	18,7	45,1	45,1	45,1	71,9
Fuerzas reales (N)		10,8	22,0	31,8	41,6	51,4	61,2	71,0
Frecuencia (seg/palada)		4,5	3	1,5	1	1	1	0,8

Tabla 38: Desglose componentes de la ecuación del modelo para la carrera de bajada para cada frecuencia.

Resultados

Fuerzas modelo (N)	$\rho g h_2(X_2)A_1$	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
	$\rho g h_1(X_1)A_2$	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
	$-\rho g h_1(X_2)A_2$	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3
	$P_{componentes}$	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6
	$\frac{\rho \cdot V_2^2}{2} K A_1$	0,2	1,0	1,6	1,6	2,4	2,4	3,0	5,3	7,6	11,9	21,2	47,6	47,6	132,2
	TOTAL	56,3	57,1	57,7	57,7	58,5	58,5	59,1	61,4	63,7	68,0	77,3	103,7	103,7	188,3
Fuerzas reales (N)		0,56	50,4	60,1	70,0	79,8	89,6	99,4	109,2	119,0	128,8	138,7	148,5	158,3	168,1
Frecuencia (seg/palada)		15	7	5,5	5,5	4,5	4,5	4	3	2,5	2	1,5	1	1	0,6

Tabla 39: Desglose componentes de la ecuación del modelo para la carrera de subida para cada frecuencia.

Como primer apunte aclararemos la causa de presentar diferentes valores de fuerzas de aplicación reales para una misma frecuencia. Resultó muy difícil recopilar valores de tiempo con diferencias por debajo de un segundo ya que como ya explicamos en el Apartado 7.2. se calcularon los tiempos por carrera experimentales por medio de un cronómetro accionado manualmente. Se puede considerar que nuestro error de medición tiene una tolerancia de ± 0.4 seg.

Presentada la información se observa claramente que los resultados de fuerzas de aplicación necesarias reales son mayores que las teóricas como norma general, solo con tiempos por carrera muy elevados resulta al contrario.

En la anterior gráfica podemos ver que los dos últimos puntos correspondientes a las fuerzas de aplicación reales en la carrera de subida se presentan por debajo de la línea que marca los valores teóricos. Esto puede deberse a que, como ya explicamos en el Apartado 6.2., para nuestro modelo consideramos que en la carrera de subida la válvula móvil está cerrada para todos los casos. A muy bajas frecuencias de paleo (muchos segundos por carrera) puede que la posición supuesta de las válvulas no se mantenga estable pudiendo haber episodios en la carrera de en los que la válvula móvil permaneciera abierta. Esto haría que la fuerza aplicada necesaria para el movimiento a muy bajas frecuencias se redujera notablemente. Lamentablemente no hemos dispuesto de piezas con materiales transparentes para ver el comportamiento de la válvula durante los experimentos con lo que el único indicio que podría manifestar que éste fenómeno estuviera ocurriendo sería la ausencia o disminución del caudal de agua en la carrera de subida a bajas frecuencias. Tampoco hicimos ensayos de caudal a tan bajas frecuencias, muy por debajo de las consideradas para producir caudales útiles, pero sí que podemos decir que mediante inspección visual el caudal extraído a tiempos por palada mayores de 10 segundos era nulo o muy escaso, consiguientemente resulta aceptable pensar que el comportamiento explicado podría ser la causa de la anomalía.

Durante los instantes en los que la válvula móvil estuviera abierta, el balance de fuerzas sería muy parecido a si tuviéramos la varilla flotando libremente en la tubería de ascensión, la válvula fija se mantendría cerrada por la presión de la columna de agua y el líquido fluiría muy lentamente de la tubería de ascensión a la cámara de compresión (a frecuencias tan lentas podríamos considerar mayor área de paso), la velocidad de paso por la válvula será tan baja que podríamos despreciar la pérdida de carga:

$$F_{aplicada\ subida\ real\ a\ bajas\ frecuencias} = P_{componentes} - \rho g h_1(X_1)(A_1 - A_2)$$

Para comprobar si nuestra hipótesis tiene sentido estudiemos de nuevo la fuerza de aplicación teórica cuando la carrera de subida dura 15 segundos considerando los anteriores supuestos. Según la Tabla 39.

Resultados

$$F_{\text{aplicada subida real a bajas frecuencias}} = 38,6 - 36,1 = 2,5N$$

La fuerza resultante es aun $1,94N$ mayor que la experimental, equivalentes a $0,198Kg$ extra que de deberíamos haber medido en con la suma de las masas de todos los elementos de los que se compone la varilla ($P_{\text{componentes}}$). No se puede dar otra explicación que no sea un error al pesar los componentes o el peso del agua que pudo introducirse en la pieza artesanal de PVC de $24cm$ de longitud utilizada en la configuración objeto de nuestro estudio. Algunos tramos de varilla de PVC no estaban perfectamente sellados y presentaban una pequeña cantidad de agua en su interior después de estar sometidos a cierta carga de trabajo como explicaremos en el Apartado 11. . No obstante, el resultado se acerca mucho más a la realidad que el modelo general pudiendo valorar nuestra nueva hipótesis como aceptable.

Por otro lado, podemos apreciar en la gráfica que en la carrera de subida, el modelo original se ajusta a la realidad en el entorno de una frecuencia de unos 6 segundos por carrera a partir de la cuál nuestros resultados teóricos empiezan a ser notablemente inferiores a los reales. Asumimos que junto con la frecuencia aumentan los fenómenos no contemplados en nuestro modelo como la diferencia de velocidades de paso del líquido por las válvulas, las fuerzas de rozamiento, la falta de estanqueidad en las juntas y la influencia de la aceleración en los movimientos. Sin embargo podemos considerar que los valores teóricos están en un entorno aceptable comparándolos con los reales y que los modelos han sido enormemente valorables para entender el comportamiento de la bomba en diferentes condiciones.

En cuanto a los valores de fuerzas de aplicación en la carrera de bajada advertimos que el modelo es aceptablemente cercano a la realidad con una tendencia en la consecución de los resultados parecida y una diferencia entre datos teóricos y experimentales de en torno a $25N$ para frecuencias normales de paleo.

Los gráficos correspondientes a las demás profundidades y configuraciones de varilla consideradas son:

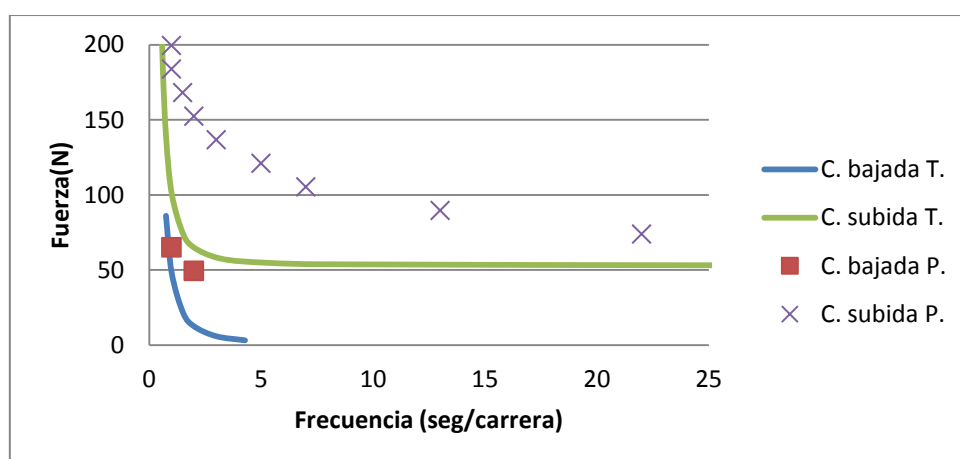


Tabla 40: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 350cm (HDPE).

Resultados

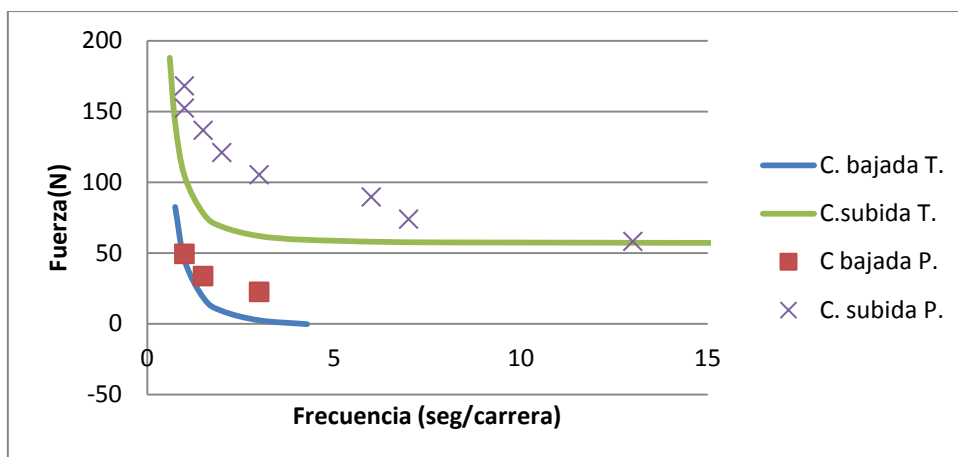


Tabla 41: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 300cm (HDPE).

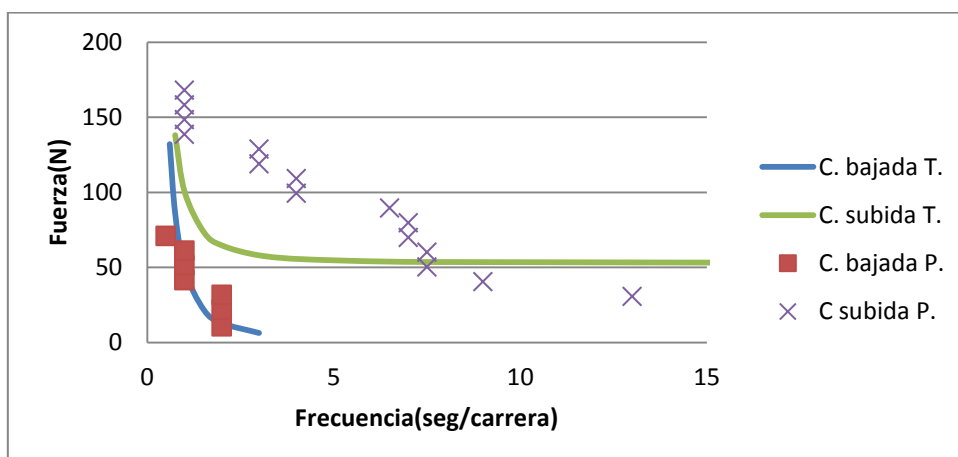


Tabla 42: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 324cm (PVC+HDPE).

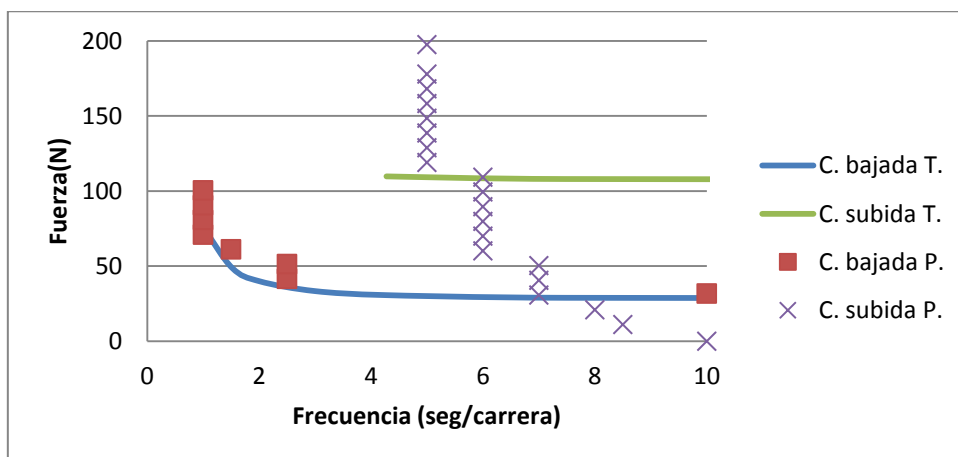


Tabla 43: Fuerzas experimentales y reales vs frecuencia, varilla de 724cm (PVC+HDPE).

Para graficar los resultados de una manera útil se han eliminado los valores de fuerza aplicada experimental de frecuencias por encima de los 15 segundos por palada.

Añadimos que en las gráficas todas las opciones de los montajes en el primer piso muestran que el modelo se ajusta aceptablemente a la realidad al igual que en la carrera de bajada de la instalación en el segundo piso. Sin embargo, fijándonos en las fuerzas reales para la carrera de subida de la instalación en el segundo piso advertimos claramente un comportamiento anómalo. Aparecen muchos puntos muy por debajo de la línea que marca el modelo. El motivo viene justificado por la hipótesis expresada anteriormente en éste apartado. Entendemos que se produce una mayor diferencia entre valores teóricos y reales a causa de la reducción en la densidad del material de fabricación de la varilla en éste último caso.

Justificamos también las anomalías en la tendencia que siguen los puntos de “c. subida p.” en el último caso a la dificultad que conlleva la perfecta aplicación de la fuerza en el centro de la circunferencia que forma la sección de la varilla en la realización de los experimentos para la obtención de fuerzas aplicadas en la carrera de subida para todas las configuraciones. El punto de aplicación de la fuerza es más importante, si cabe, trabajando con varillas de longitudes grandes porque los tubos de las que estas se componen son más largos y tienden a doblarse produciendo un mayor rozamiento de la junta de estanqueidad de la válvula móvil con la tubería de ascensión. Por todo lo anterior observamos también la abundancia de puntos con diferentes fuerzas de aplicación a la misma frecuencia y la ausencia de datos de fuerza aplicada a altas frecuencias de paleo.

8.3. *Análisis.*

Se ha considerado oportuno incluir éste apartado para expresar información adicional importante que de otro modo hubiera quedado demasiado dispersa.

Comenzamos por un breve análisis de los resultados vinculados con el caudal diciendo que los resultados del modelo reflejan fielmente la realidad como era de esperar. El desarrollo de las ecuaciones utilizadas resulta intuitivo y el gran rendimiento volumétrico de bombas de agua de mano de acción directa como la MALDA corrobora lo que desde un primer momento supusimos que ocurriría, no queda mucho más que comentar aparte de que los caudales de pérdidas obtenidos son los esperados para una instalación de estas características.

En cuanto a las fuerzas de aplicación necesarias para el funcionamiento de la bomba no podemos decir que los resultados del modelo hayan sido tan exactos. Hemos comprobado que nuestras ecuaciones funcionan para cierto rango de frecuencias de paleo pero está claro que hemos obviado elementos importantes para caracterizar el funcionamiento mas rigurosamente. Como se ha dicho en el Apartado 8.2. desde el principio supimos que nuestro modelo no sería capaz de reproducir la influencia de factores como la diferencia de velocidades de paso del líquido por las válvulas, las fuerzas de rozamiento, la falta de estanqueidad en las juntas y la influencia de la aceleración en los movimientos. Consideramos en algunos casos que las aproximaciones realizadas serían suficientes para caracterizar el funcionamiento y en otros que la dificultad asociada a la obtención de los datos no merecía la pena en comparación con el grado de precisión con el que dotaríamos a nuestro modelo incluyéndolos.

Se puede considerar que nuestro razonamiento fue correcto pero desconocíamos otro factor determinante, casi imperceptible por debajo de las 40 *paladas/minuto* y manifestándose progresivamente de una manera más clara a partir de esa frecuencia. Se apreciaba un gradiente positivo de resistencia a los movimientos ascendente y descendente de la varilla en la misma palada, es decir, había que hacer mucha más fuerza en el tramo final de las carreras que en el tramo inicial.

Desde el principio, antes el montaje inicial, nos dimos cuenta de que el tamaño y la forma de los orificios por los que debía circular el agua a través de las válvulas no era el más favorable para que éste se produjera con la mínima resistencia posible. Por esto estimamos que el gradiente de resistencia en la carrera de subida se produce a causa de la oposición que encuentra el agua para llenar la cámara de compresión fluyendo desde el pozo. Esta resistencia da lugar a que cuando necesitamos que esta acción se produzca en un breve espacio de tiempo tengamos que succionar el agua desde el interior de la bomba en lugar de solamente permitir que pase siendo empujada por la propia presión hidrostática.

A frecuencias altas de paleo, la succión es tan elevada que se produce un llenado incompleto de la cámara de compresión porque el tiempo que la válvula fija permanece abierta es insuficiente. A causa de lo anterior, el primer tramo de la carrera de bajada se invierte en igualar las presiones de la cámara de compresión y la tubería de ascensión sin flujo de agua llegando incluso a producirse movimiento brusco descendente de la varilla a causa de la baja presión y el llenado incompleto en la cámara.

También se puede apreciar e incluso escuchar la enorme pérdida de carga que experimenta el fluido en la válvula móvil cuando desciende la varilla.

Dicho de otro modo, utilizando la ecuación de Bernoulli calculamos la velocidad de paso del fluido por la válvula inferior que proporciona solo la presión hidrostática:

$$\underbrace{\left(p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot Z_1\right)}_{P_1} = \underbrace{\left(p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot Z_2\right)}_{P_2}$$

Si trabajamos con presiones manométricas, consideramos la velocidad de la superficie libre v_1 despreciable, P_1 es la presión en la superficie libre del agua en el depósito o pozo, P_2 es la presión justo a la salida de la válvula fija (según la dirección de la corriente de agua) y, siguiendo con el sistema de referencia de la Figura 22, $Z_1 = h_1(x_2) = 1m$ y $Z_2 = h_2(x_2) = 0.5m$ (valores iguales a los de nuestras instalaciones) tenemos que:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1(x_2) - h_2(x_2))} = 3.132 \text{ m/seg}$$

Resulta la velocidad máxima de llenado proporcionada por la presión hidrostática nada más abrirse la válvula fija, considerando esta vez $D_{\text{orificio de paso en la válvula}} = 20mm$ por las bajas velocidades, en las condiciones de nuestros experimentos con distancia entre válvulas óptima o superior, que según la siguiente ecuación:

$$t_{\text{carrera}} = \frac{V_{\text{cámara de compresión}}}{A_{\text{orificio de paso en la válvula}} \cdot v_2} = 2,7 \text{ seg/carrera}$$

Nos proporciona la frecuencia máxima a la que la cámara de compresión se llena sin que la varilla produzca succión en el movimiento ascendente de la carrera de subida y es equivalente a 11,1 paladas por minuto. Para concretar, diremos que la velocidad anteriormente calculada irá

Resultados

disminuyendo a medida que la cámara se vaya llenando ($(h_1(x_2) - h_2(x_2))$ disminuye progresivamente en la carrera).

Una vez conocido de forma un poco más precisa qué sucede en la secuencia de llenado de la cámara se puede pensar que podíamos haber introducido éste factor en la ecuación correspondiente a las fuerzas de aplicación en la carrera de subida del modelo utilizando la ecuación de los gases ideales para procesos termodinámicos. De ese modo conseguiríamos una relación entre presiones y volúmenes en diferentes momentos del proceso pero tendríamos que disponer de valores concretos de velocidades de paso del agua por la válvula fija para hallar los volúmenes necesarios y no pudimos conseguirlos de forma precisa.

Para finalizar diremos que aun con todo lo descrito en éste apartado calificaremos las ecuaciones del modelo de fuerzas como aceptable siendo un inmejorable punto de partida para posteriores estudios en aun más profundidad.

9. Propuestas sobre métodos para la optimización.

Como se ha manifestado en apartados anteriores cabe calificar la idea del diseño de la MALDA como sobresaliente, no obstante se mostrarán a continuación ciertos apuntes que podrían utilizarse para mejorar sus prestaciones.

9.1. *Materiales de fabricación.*

Primeramente analizaremos la naturaleza de los materiales de los elementos a nuestra disposición inicialmente. La elección del acero galvanizado para las piezas de bomba que de él están fabricadas resulta acertada por sus propiedades mecánicas no estimando necesario aportar alternativas.

Sin embargo la elección de materiales plásticos para el resto de componentes no resulta tan obvia y por eso deberemos analizar más a fondo las posibilidades que el mercado nos ofrece:

Entendemos el por qué de la elección del polietileno de alta densidad como material predominante en la instalación. Si tuviéramos que seleccionar materiales para la construcción de un artefacto concebido para operar en condiciones similares a las que la MALDA está diseñada para ser usada, buscaríamos sin duda que fueran lo más duro posible.

En nuestro caso, examinando los materiales más usados para la fabricación de tubos encontramos una diferenciación entre dos grandes familias en cuanto a sus propiedades mecánicas:

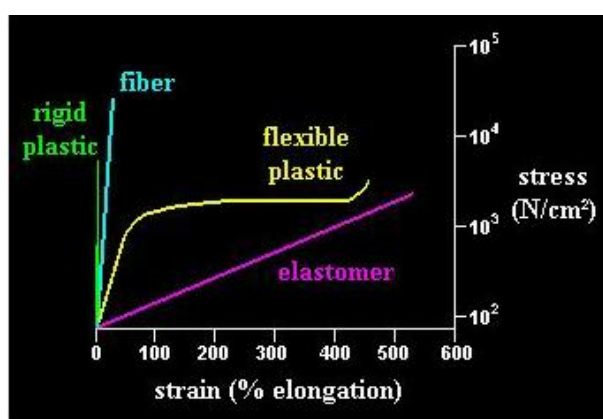


Gráfico 12: Tensión Vs Deformación de plásticos utilizados para fabricación de tubos. After Odian, George; Principles of Polymerization, 3rd ed., J.Wiley, New York, 1991.

Como podemos apreciar el Gráfico 12 los plásticos flexibles como el polietileno y el polipropileno se deforman rápidamente pero ofrecen mucha resistencia a la rotura. Por el contrario los plásticos rígidos como el PVC presentan una alta resistencia a la deformación pero son mucho más frágiles.

Propuestas sobre métodos para la optimización

Las propiedades mecánicas de los materiales de los tubos no han sido relevantes en la realización de éste proyecto ya que, por la naturaleza de nuestros experimentos, tan solo hemos requerido que los tubos fueran suficientemente resistentes ante los esfuerzos de tracción y compresión solicitados para el movimiento en dirección vertical de la varilla y ante el esfuerzo de tracción al que se encontraba sometida la tubería de ascensión por el hecho de permanecer colgada de la base del cuerpo de la bomba.

Indiscutiblemente para un montaje en condiciones reales de utilización hubiera sido esencial disponer de piezas fabricadas con plásticos flexibles. Podríamos citar, por ejemplo, el momento en el que se introduce la tubería de ascensión dentro del pozo y posteriormente la varilla dentro de ésta según el método recomendado por la SKAT en el manual de montaje (Anexo 2) como situaciones en las que es indispensable que los tubos presenten una alta resistencia a la rotura. Tampoco sería beneficioso haber elegido componentes de materiales frágiles si existieran corrientes subterráneas en el pozo del que pretendemos obtener agua.

En contraposición a las imprescindibles propiedades mecánicas de los tubos fabricados con plásticos flexibles, encontramos que la naturaleza de éste material impide que sea pegado con pegamento. Las únicas maneras de conectar dos tubos de polietileno o polipropileno son o por medio de roscas o por termofusión. Ésta característica se presenta sin duda como una desventaja según los principios del concepto VLOM especificados en el Apartado 3.3. por eliminar la posibilidad de efectuar un arreglo provisional con pegamento si alguna pieza resulta dañada y no se dispone de recambio.

Refiriéndonos ya a los componentes plásticos de la MALDA, concretamente a la tubería de succión, tubería de ascensión, varilla y conectores varios, hemos asumido que es imprescindible que estén fabricados de plástico flexible. Originalmente estas piezas están fabricadas en polietileno de alta densidad, éste material se presenta como una opción correcta aunque podrían utilizarse otro tipo de polímeros. Como alternativa proponemos la fabricación de dichas piezas con el ya mencionado material denominado polipropileno. El polipropileno posee unas propiedades mecánicas parecidas a las del polietileno y suficientes como para recomendar su empleo en la MALDA además de que su frecuente uso en la industria proporcionaría garantías en cuanto al abastecimiento.

Las principales diferencias entre los dos materiales son:

- Monómero de polietileno es etileno y monómero de polipropileno es propileno.
- El polietileno tiene un punto de fusión más bajo en comparación con el punto de fusión más alto del polipropileno.
- El polipropileno es más rígido y resistente a los productos químicos y solventes orgánicos en comparación con el polietileno.
- El polipropileno no estira y es generalmente más rígido que el polietileno. Tiene una densidad menor.
- El precio del polipropileno es aproximadamente tres veces mayor que el del polietileno.

La principal razón por la que proponemos una alternativa al polietileno es por la extrema dificultad que tuvimos para encontrar tubos de las medidas originales. El principal problema fue el enorme espesor requerido. El espesor de fabricación de los tubos depende proporcionalmente de la presión a la que se encontrará el fluido conducido por ellos con lo que un espesor muy grande significa un diseño para una alta presión en el interior. Aunque los espesores de las tuberías originales están contemplados en la norma ISO 4427 prácticamente ningún distribuidor tiene en su poder componentes capaces de soportar tan altas presiones por su escasa utilización en instalaciones

normales. Dichas presiones corresponderían a 12.5atm para los tubos que forman la tubería de ascensión y 20atm para los que forman la varilla y los que deben ser usados para fabricar los conectores de la tubería de ascensión.

Esta es la razón de la propuesta del polipropileno como alternativa. Las tuberías fabricadas con éste segundo polímero necesitan de más espesor que las de polietileno para soportar una presión interior igual de grande. El motivo por el que nuestra instalación requiere tubos de espesores tan grandes es solo el aporte de robustez que dan al conjunto, las presiones a las que trabaja la MALDA rara vez superarán el valor de 1atm (presión manométrica) por lo que los tubos están sometidos a mínimos esfuerzos en lo que a presión interior se refiere.

Así, utilizando polipropileno como marial de fabricación de las tuberías subterráneas, necesitaríamos tubos que resistiesen solo 10 y 16atm . Valores altos pero menores a los requeridos si las tuberías fueran de polietileno y por consiguiente más fáciles de encontrar.

Asimismo, el hecho de que el peso específico del polipropileno sea menor que el del polietileno proporcionaría un trasvase de energía necesaria para el funcionamiento de la bomba, maximizando los valores en la carrera de subida y minimizándolos en la carrera de bajada; siendo beneficioso para el usuario sobre en la extracción a grandes profundidades.

El principal punto en contra sería en precio de fabricación de los componentes además de que seguiríamos necesitando buscar empresas que mecanizaran las roscas de los tubos y conectores.

Otra solución al problema de abastecimiento de piezas de recambio sería la creación de un dossier actualizado cada cierto tiempo en el que se mostraran las empresas en posición de distribuir, mecanizar y termofundir los componentes necesarios para reparar la MALDA en caso de avería. Por lo menos en las regiones donde se están enviando mayor número de unidades.

9.2. Rediseño de las válvulas.

Si bien las modificaciones que se recomendarán a continuación tienen un carácter mucho más profundo se ha considerado necesario incluirlas en éste apartado por su importancia en cuanto a la optimización energética de la bomba.

Se presentarán a continuación propuestas que afectan al diseño original y que supondrían cambios significativos en el proceso de fabricación de componentes esenciales para el funcionamiento de la MALDA.

En primer lugar nos centraremos en la pérdida de carga que experimenta en fluido en su paso por las válvulas, ante la escasez de información relacionada con el tipo de válvulas que se utilizan en el mecanismo de la bomba nos hemos visto obligados a estimar un valor para el coeficiente adimensional de pérdida de carga $K = 2$ pero realmente no tenemos conocimiento de su valor exacto.

Es comúnmente conocido que la constante adimensional de pérdida de carga aumenta cuanto más dificultad ofrezca el conducto a que el fluido circule por su interior. Aristas vivas, superficies rugosas y cambios bruscos de dirección o diámetro del conducto son singularidades que debemos

Propuestas sobre métodos para la optimización

evitar en la medida de lo posible para reducir la fuerza necesaria para hacer pasar el fluido por el interior de las válvulas.

Tomaremos como referencia el detalle de la válvula de pie para estudiar las restricciones a las que el flujo de agua está sometido en su paso por ella. La válvula móvil es físicamente idéntica, la única diferencia es que la de pie permanece en reposo, con lo que las conclusiones obtenidas serán válidas para ambas válvulas.

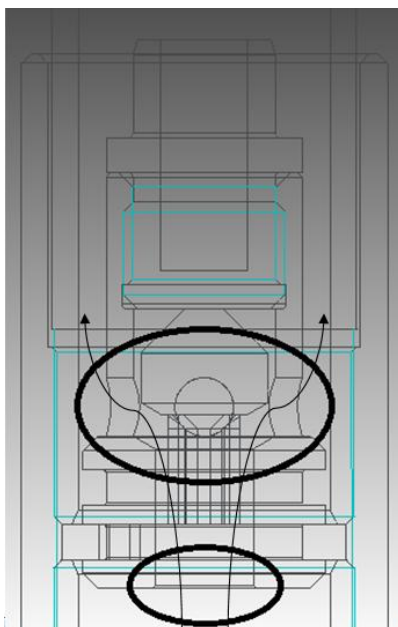


Figura 24: Detalle válvula de pie abierta. Ubicación de puntos singulares y líneas de flujo.

En a Figura 24 podemos detectar claramente las dos zonas críticas en el paso del fluido por la válvula, una es el cambio de sección en la transición de la tubería de succión al interior del cuerpo de la válvula, la otra corresponde a los cambios de dirección en sentido radial que experimenta el fluido al pasar de la válvula a la cámara de compresión. En ésta última zona, el fluido también experimenta un cambio brusco de área de paso.

Observamos que aparte de pequeños redondeos y achaflanados, existen aristas vivas y cambios de dirección bruscos innecesarios en las zonas objeto de nuestro estudio. No dejamos a un lado el abaratamiento de costes que supone la fabricación de piezas con formas sencillas, sin embargo a continuación se expondrán modificaciones en la fisionomía de la válvula que permitirían la optimización energética de la bomba dejando para proyectos posteriores la valoración de su implantación atendiendo a aspectos económicos.

Sorprendentemente también observamos que con la válvula abierta, la bobina hace tope con el conector macho roscado en la parte superior del cuerpo no permitiendo aprovechar el diámetro completo de los agujeros fabricados para la transmisión del fluido desde el interior del cuerpo hasta la cámara de compresión, ya de por sí pequeño. Importantes detalles como éste, el cual se solucionaría simplemente aumentando la longitud del cuerpo de la bomba unos milímetros, nos llevan a plantear las siguientes modificaciones:

- Aumento de la longitud del cuerpo de la válvula en la zona de recorrido de la bobina y en la zona inferior, acompañado de un aumento de diámetro y acampanado en el conducto de entrada.

Propuestas sobre métodos para la optimización

- Inclinación del eje (a favor de la corriente) y aumento de diámetro de los agujeros practicados para permitir la salida del fluido del interior del cuerpo de la válvula.
- Acampanado del perfil interior de la parte inferior de la bobina (guía).

Las modificaciones propuestas nos obligarían a tener que practicar también un aumento de longitud en la cabeza y en la guía de la bobina a causa del incremento de diámetro de los agujeros y de longitud en el cuerpo de la válvula respectivamente.

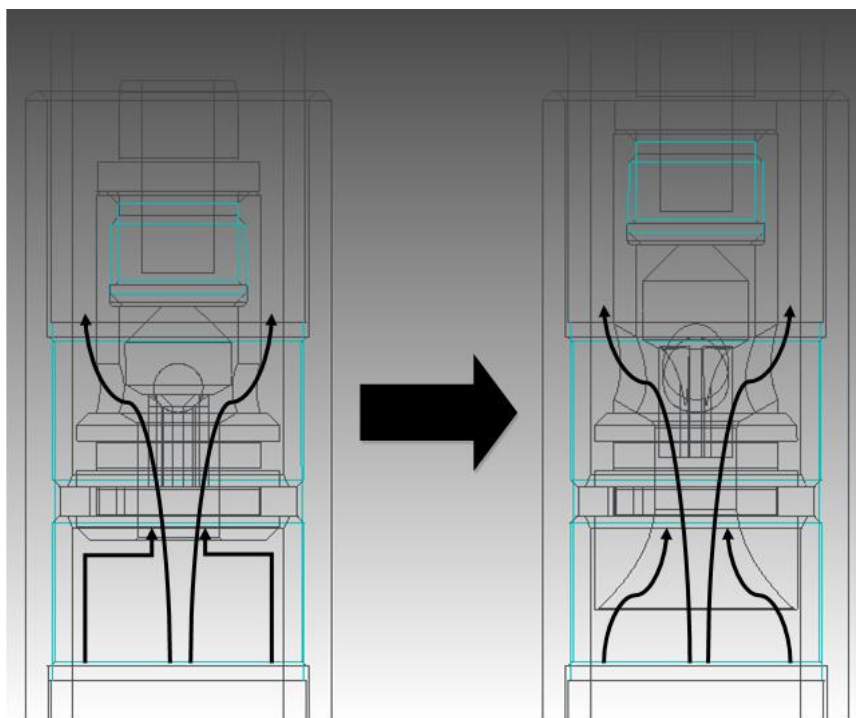


Figura 25: Evolución de la fisonomía de la válvula de pie y líneas de corriente con la implantación de las propuestas de optimización.

Al no haberse practicado un estudio de los esfuerzos a los que los componentes de la válvula están sometidos se ha intentado imprimir un carácter conservador en cuanto al mantenimiento de la integridad estructural y simplicidad de fabricación del conjunto. Sin embargo podrían contemplarse modificaciones más profundas pero arriesgadas estructuralmente siendo necesario el citado estudio para conocer en qué grado podrían llevarse a cabo:

- Mayor inclinación del eje y aumento de diámetro de los agujeros practicados para permitir la salida del fluido del interior del cuerpo de la válvula.
- Aumento de diámetro del conducto interior del cuerpo de la válvula, por el que el fluido se mueve en dirección axial.
- Achatamiento de la parte superior de la cabeza de la bobina.
- Disminución del espesor de los nervios de la guía de la bobina.

Estas nuevas propuestas conllevarían una disminución de la longitud del cuerpo de la válvula en la zona de recorrido de la bobina y una variación de inclinación en los componentes que guían el fluido en el cambio de dirección de axial a radial (mixto en este caso); acampanado del perfil interior de la parte inferior de la bobina y achaflanado de la parte superior del conducto interior del cuerpo de la válvula.

Sorprendentemente, parece que no somos los primeros en detectar la necesidad de una reforma en el diseño de las válvulas. En el Anexo 1, plano C5080, la SKAT ofrece ya una alternativa de mejora referente al cuerpo de las válvulas.

Lamentablemente hay que descartar la idea de modificar las medidas de los tubos para incrementar la eficiencia energética de la MALDA, un fluido moviéndose a través de un conducto experimenta menor resistencia cuanto mayor sea el diámetro de éste. Aumentando los diámetros de los tubos también daríamos lugar a la posibilidad de un mejor guiado del fluido en las válvulas siendo estas más grandes y por consiguiente con más espacio en su interior para suavizar los cambios de dirección necesarios para el funcionamiento de la bomba, pero también supondría un posible aumento de volumen en la columna de agua con su correspondiente peso añadido además del incremento del peso de los componentes.

10. Conclusiones.

Llegados a este punto, es de vital importancia presentar conclusiones relativas a una visión global de la MALDA. No debemos olvidar que el objeto de estudio de nuestro proyecto es una bomba de agua diseñada para abastecer a comunidades de seres humanos situadas en regiones del planeta donde las condiciones de habitabilidad distan mucho de ser las más deseables. A razón de lo anterior intentaremos ir un paso más allá partir de la información recopilada.

Innegablemente, la idea del mecanismo de esta bomba es tan sencilla como brillante, la utilización de una varilla ligera y de diámetro próximo a la tubería de ascensión hace que el peso que se levanta en la carrera de subida sea mucho menor que si se usara una varilla fina y de pesado acero. La reducción del peso de los componentes y la cantidad de agua desplazada trata de dar solución al problema del gasto energético en la extracción, uno de los principales problemas en el ámbito del bombeo manual. Pero la realidad es que se ha comprobado que el peso de la varilla y la columna de agua en la carrera de subida no es el único problema al que se enfrenta un diseñador de bombas de agua de acción directa. Como se hace referencia en el apartado anterior, el tamaño y la fisionomía de las válvulas es el otro importante aspecto a revisar para incrementar el rendimiento energético del sistema.

Habiendo extraído una cantidad considerable de agua con la MALDA bajo las más variadas condiciones y teniendo en cuenta los errores que hayamos podido cometer llevando a cabo nuestros experimentos, nos consideramos en posición de recomendar su utilización en profundidades no muy superiores a los 7,24m que son la mayor profundidad con la que hemos experimentado. Por encima de ella el desgaste sufrido por el usuario a frecuencias normales de paleo podría ser excesivo.

Entendemos de este modo que el esfuerzo que realiza el usuario en la carrera de subida es uno de los principales factores limitantes en cuanto a las prestaciones de la bomba. Sin embargo, podemos considerar el diseño como bueno ya que a la luz de los datos expresados en las gráficas del Apartado 8.2. las fuerzas necesarias para llevar a cabo la extracción de agua son relativamente contenidas.

Por otro lado también puede valorarse positivamente el diseño de la bomba en cuanto al procedimiento de montaje y los métodos de reparación. Incuestionablemente, la fabricación de la tapa para cubrir el pozo y anclar el cuerpo de la bomba es a lo más complicado a lo que se enfrentará cualquiera que se encuentre en disposición de poner la MALDA en funcionamiento.

Una vez fabricado el sistema de cubrimiento del pozo y entendidas las instrucciones de montaje contenidas en el Anexo 2, éste no durará más de una hora. Podría recomendarse un equipo de por lo menos 3 individuos para que este proceso se efectúe de la forma más rápida y segura posible.

Conclusiones

En cuanto a las reparaciones, teniendo las piezas de repuesto y si el problema se puede solucionar extrayendo solo la varilla, no debería suponer más de unos pocos minutos. Si por el contrario el origen de la avería se encuentra en la tubería de ascensión, su extracción sería equivalente a un desmontaje completo de todo el conjunto, estimando un tiempo de media hora aproximadamente para su ejecución. Lo más complicado en el proceso de montaje es el correcto ensamblaje de piezas importantes de pequeño tamaño como juntas de estanqueidad o anillos de sujeción y seguridad que deben ir situadas en los cuerpos de las válvulas o la parte superior de la varilla, éstos elementos deben incluirse independientemente de la profundidad del pozo por lo que los tiempos de montaje no varían proporcionalmente con la profundidad.

Tardaremos sólo unos pocos minutos más en instalar una MALDA preparada para extraer agua a 10m de profundidad que una para hacerlo a 5m.

Para terminar se podría decir que ahora que conocemos las características del laboratorio y de la bomba, podríamos ser capaces de hallar la ecuación que caracterice los esfuerzos necesarios para la extracción de manera muy próxima a la realidad. Comprobado que nuestras ecuaciones son válidas a bajas y muy bajas frecuencias, sólo harían falta ensayos para determinar datos como velocidades de paso del fluido por la válvula fija y coeficientes de rozamiento. Con todo ello y añadiendo el factor aceleración en los desplazamientos podrían conseguirse aun mejores resultados.

11. Incidencias.

A pesar del generoso volumen de información ofrecida en el Apartado 5. que podría haber sido expuesta en el que ahora nos encontramos pero que se consideró necesaria para la comprensión de los motivos que nos llevaron a la realización de los diversos montajes tal y como finalmente los efectuamos, se produjeron una innumerable cantidad de incidencias obviadas hasta el momento.

Muchas de ellas fueron obstáculos relativamente fáciles de salvar, sin embargo, otra gran parte supusieron considerables retrasos, modificaciones y arreglos que nos llevan a calificar este último grupo como dignos de mención.

El primer gran contratiempo al que fue necesario enfrentarse correspondió a la falta de información técnica concreta a cerca de la MALDA, altamente necesarios para la ejecución de los cálculos previos. Sobre todo relativa a las válvulas, siendo éstas de tan extraña naturaleza resultó imposible recopilar datos concretos fuera de la bibliografía propia de la bomba de la que disponíamos. Como pueden comprobar, los Anexos 1 y 2 tan solo ofrecen información sobre la fisionomía, comprobaciones y montaje de la bomba. Esto nos llevó a pensar en un principio que los factores más importantes que determinarían en comportamiento de la bomba serían los más fácilmente deducibles. Llegados al punto en el que ahora nos encontramos tenemos indicios para pensar que esa idea era errónea.

Se podría decir que la otra gran fuente de incidencias durante la ejecución del montaje y los ensayos fue la falta de materiales necesarios para la construcción del sistema de tuberías. La dificultad para encontrar componentes adecuados para las diferentes instalaciones supuso un problema pero tenía la ventaja de hacer posible la búsqueda de alternativas. Los mayores contratiempos los encontramos en las ocasiones en las que se rompieron piezas originales irremplazables de la bomba necesarias para todos o gran parte de los experimentos programados.

Como ejemplo más importante relacionado con este tipo de incidencias resaltaremos la rotura del conector hembra del primer tramo de la varilla en el que se encuentra alojado el anillo de seguridad (Anexo 1, plano B5033).

La primera rotura de produjo en el transcurso de los experimentos con el cuerpo de bomba anclado en el primer piso del laboratorio. En un primer momento supusimos que la incidencia había sido ocasionada por el golpe de algún elemento contundente contra el asidero por lo que no modificamos ningún aspecto de los procedimientos de ejecución de los experimentos. Los técnicos del departamento consiguieron arreglar la pieza en un breve espacio de tiempo y continuamos con nuestras tareas.

La misma pieza volvió a romperse por el mismo sitio al comienzo de los experimentos con el cuerpo de la bomba anclado al segundo piso del laboratorio y en este caso, el incidente fue achacado a la debilidad estructural del conector hembra en la zona de la primera fractura. Esta vez tuvimos que descartar la reparación por los importantes desperfectos sufridos por el componente afectado con lo que tuvimos que sustituirla por otro de los conjuntos de piezas originales de las que disponíamos del mismo material y longitud pero sin el rebaje en el conector macho para situar el anillo de seguridad. Quedaban ya muy pocos experimentos por realizar así que decidimos sustituir el anillo de seguridad por una arandela de latón.

Inesperadamente, se produjo una tercera rotura, la primera de la nueva pieza en el mismo punto que las dos anteriores en la antigua. Indudablemente era imposible que ésta última se hubiera producido debido a la debilidad estructural del componente lo que nos llevó a la búsqueda de una explicación que aclarara esta sucesión de incidentes.



Ilustración 14: Detalle fractura de los conectores originales en el punto de anclaje con el asidero.

Llegamos a la conclusión de los experimentos realizados para recopilar los datos de fuerzas aplicadas necesarias para el accionamiento de la bomba se habían efectuado confiando en una resistencia estructural de los componentes que al final no era tal. Sospechamos que los esfuerzos que originaron las fracturas se dieron lugar durante las pruebas para la obtención de datos en la carrera de subida. La pieza que desempeña la función de amortiguador solamente actúa en la carrera de bajada, el golpe producido al llegar al final de la carrera de subida es absorbido por el anillo de seguridad, que hace de tope, contra la pieza que hace de guía en la parte superior del cuerpo de la bomba directamente, transmitiendo un pico en los esfuerzos de tracción de la varilla. No se puede considerar un defecto de diseño puesto que con un funcionamiento normal (bomba accionada por el usuario) los golpes que creemos origen de los desperfectos se reducen considerablemente en cantidad y magnitud.

Por otro lado, se puede considerar normal que el punto de falla sea siempre el mismo porque en él se concentran los citados picos de esfuerzos de tracción junto con los posibles esfuerzos cortantes fruto de las imperfecciones en el punto de aplicación de la fuerza de accionamiento en el paleo. Puede llegar a ser un problema porque aunque con nuestros experimentos hemos maximizado estos esfuerzos no es menos cierto que es imposible que una persona aplique al asidero exactamente la misma fuerza con los dos brazos.

Finalmente conseguimos recabar la totalidad de los datos necesarios para la finalización del proyecto con el tercer fragmento de la varilla original de 0,5m de longitud de los que disponíamos.

A causa de las citadas incidencias y de la rotura de algún otro componente necesario para los ensayos se tuvieron que recalcular los balances de fuerzas requeridos para el Apartado 6.2., siendo necesario incluir componentes no contemplados al principio, en la Tabla 21.

Sin abandonar las incidencias relativas a las dificultades encontradas para la adquisición de materiales también se debe mencionar el sorprendente fallo cometido por el personal de la empresa que nos suministró el fragmento de la tubería de ascensión requerido para los montajes en el segundo

piso del laboratorio. Increíblemente, no prestaron la atención necesaria en la lectura del documento que recibieron de nuestra parte con las medidas de las piezas que necesitábamos, fabricando un tubo de HDPE PE-80 de 63mm de diámetro y 5,8mm de espesor roscado por ambos extremos con una longitud de 424mm en vez de 424cm como necesitábamos. Por ello y aunque reconocieron que el fallo había sido suyo hubo que esperar varias semanas más de las que ya esperamos para disponer de la nueva pieza, pero las consecuencias del citado error no quedaron ahí.

En la búsqueda de material era requisito indispensable que las roscas de los extremos de las piezas de la tubería de ascensión fueran mecanizadas directamente sobre el tubo ya que si se mecanizaban aparte y se fijaban por termofusión, además de ser inviable económicamente, las rebabas que quedarán a los lados de la junta producidas por dicho método de pegado harían perder mucho tiempo en los montajes y desmontajes de las tuberías subterráneas necesarios para la experimentación.



Ilustración 15: Rebaba producida por el pegado por termofusión.

Esta rebaba mostrada en la Ilustración 15 se produce igualmente en la parte interior del punto de unión e impediría la extracción de la varilla desde la parte superior del cuerpo de la MALDA ya que la junta de estanqueidad de la válvula móvil está diseñada, como es normal, para moverse lo más pegado posible a la superficie interior de la tubería de succión, con lo que su paso de un lado a otro de la junta termofundida sería imposible.

Volviendo al problema que supuso la falta de atención del personal de la empresa diremos que la única solución ofrecida por su parte consistía en cortar las roscas de la pieza que habían mecanizado y que no valía y pegarlas por termofusión a un tubo de la longitud requerida para nuestra instalación sin coste adicional y que una nueva pieza mecanizada directamente en la tubería sería muy difícil de conseguir por la gran longitud de ésta. Así nos encontramos de nuevo como al principio.

Llegados a este punto decidimos aceptar la primera de sus ofertas siendo conscientes de las complicaciones esto supondría y de que el componente que recibiríamos no sería válido para un supuesto montaje en campo.

12. Bibliografía.

- Arlosoroff, S., Tschannerl, G., Grey, D., Journey, W., Karp, A., Langenegger, O. and Roche, R. (1987). Community Water Supply: The Handpump Option. The World Bank: Washington D.C.
- Jacobsen, Michael, Webster Michael and Vairavamoothy, Kalanithy. (2013). The Future of Water in African Cities: Why Waste Water. . The World Bank: Washington D.C.
- Baumann E. (2000). Water lifting. Published by: SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management.
- Gleick P H, (1996). Basic water requirements for human activities: meeting basic needs, Water International, 83-92.
- Reynolds, J. (1992). ‘Handpumps: Toward a Sustainable Technology’, UNDP World bank Water and Sanitation Program.
- Skat Foundation (2002). Public Domain Handpumps for Drinking Water. SKAT – HTN Publication.
- Skinner, Brian and Shaw, Rod (2002) VLOM pumps. WEDC Loughborough University Leicestershire.
- Odian, George G. (1991). Principles of Polymerization, 3rd Edition.
- UNICEF. Manual sobre el agua (1999).
- <http://www.ambientum.com/revistanueva/2005-09/aguas.htm>
- <http://www.cec.uchile.cl/~ci51j/txt/Apuntes/Tema01.pdf>
- <http://www.ambientum.com/revistanueva/2005-09/aguas.htm>
- <http://www.dicc.hegoa.ehu.es/listar/mostrar/8>
- http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1
- www.climate.org
- www.construnario.com/catalogo/jimten-sa/catalogos#/6/
- www.elregante2.galeon.com/tubospe.html
- www.soheval.cl/files/Tablas_tecnicas.pdf

Bibliografía

- www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema8.PDF
- www.miliarium.com/Paginas/Prontu/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.htm
- <http://www.fisicaeingenieria.es/resources/tuberias.pdf>
- Tomillo Gutiérrez, Unai (2005). Estudio acerca del empleo de la bomba manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo. Proyecto de fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- Arroyo Fernández-Rañada, Jaime (2009). Diseño de un banco de ensayos de bombas manuales. Proyecto de fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- Esperón Rodríguez, Ignacio (2012). Hidráulica , Bombas manuales de pistón , Abastecimiento de agua. . Proyecto de fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- Ferrer Saavedra, Sergio (2012). Instrumentación, adquisición de datos y ensayo de bombas de agua manuales de pistón: Afridev. Proyecto de fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.